



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 9, № 4, 2025

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода
Иван Иванович

доктор технических наук,
профессор

зам. главного редактора:

Гончаренко
Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов
Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

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

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

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

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

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

С декабря 2023 г. журнал включен в российский перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по 5 научным специальностям отрасли технических наук: 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, 2.10.1. Пожарная безопасность, 2.10.2. Экологическая безопасность, 2.10.3. Безопасность труда, 3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

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

Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.

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

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

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

+37517 341-32-99

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

Email редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Пожаробезопасность и взрывозащита зданий и сооружений. Огнестойкость строительных материалов

Ле Ань Туан, Фан Ань, Нгуен Тхи Нгок Ань, До Нгок Бич, Нгуен Хыу Хиеу Химические стратегии огнезащиты пористых огнеопасных материалов: достижения, применение и экологические соображения 455

Пивоваров А.В., Лахвич В.В., Кобяк В.В., Казутин Е.Г. Пожары с участием электромобилей в Республике Беларусь: статистический анализ, особенности развития и тушения 474

Аварийно-спасательная техника, оборудование и экипировка. Тренажерная техника

Максимов П.В. Повышение пожарной безопасности и огнетушащей эффективности генератора аэрозоля модифицированной конструкции 484

Василевич Д.В., Гуськов С.Н. Применение гидроабразивной резки при ликвидации чрезвычайных ситуаций 493

Иванов Ю.С., Кашанкова В.В. Аналитический обзор исследований основных защитных свойств средств индивидуальной защиты головы 506

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

Крецу Р.М., Рыбаков А.В. Приоритизация мер снижения рисков техногенных чрезвычайных ситуаций с учетом вклада сценариев в общую неопределенность 517

Амшинов Н.М., Ажмухамедов И.М. Методика управления рисками чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при газодобыче 530

Безопасность в ЧС. Экологическая безопасность

Байков В.И., Нахай Д.М. Растекание капель воды и водных растворов полимера по твердой горизонтальной поверхности 542

Ребко Д.В. Анализ вероятности возникновения ветровалов на территории Республики Беларусь 551

Миканович Д.С., Курский И.А., Казутин Е.Г. Прогнозирование аварийных ситуаций на водоемах технического назначения 562

Нормативно-правовое и методическое обеспечение деятельности МЧС

Кузнецова М.А., Зарипова С.Н. Постановка задачи обоснования рационального варианта комплектования территориальных подразделений государственного пожарного надзора МЧС России личным составом 570

Правила предоставления статей 584

CONTENTS

Fire safety and explosion protection of buildings and structures. Fire resistance of building materials

Le Anh Tuan, Phan Anh, Nguyen Thi Ngoc Anh, Do Ngoc Bich, Nguyen Huu Hieu
Chemical strategies for fireproofing porous flammable materials: advances, applications, and environmental considerations 455

Pivovarov A.V., Lakhvich V.V., Kobyak V.V., Kazutin E.G. Fires involving electric vehicles in the Republic of Belarus: statistical analysis, development features and extinguishing methods 474

Emergency rescue techniques, equipment and outfit. Training equipment

Maksimov P.V. Increasing fire safety and fire extinguishing efficiency of an aerosol generator with a modified design 484

Vasilevich D.V., Gus'kov S.N. The use of waterjet cutting in emergency response 493

Ivanov Yu.S., Kashankova V.V. Analytical review of research on the main protective properties of personal head protective equipment 506

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

Kretsu R.M., Rybakov A.V. Prioritization of measures to reduce the risks of man-made emergencies taking into account the contribution of scenarios to overall uncertainty 517

Amshinov N.M., Azhmukhamedov I.M. Methodology for managing the risks of situations leading to negative environmental impacts during gas production 530

Safety in emergencies. Ecological safety

Baykov V.I., Nakhay D.M. Spreading of water droplets and aqueous polymer solutions on a solid horizontal surface 542

Rebko D.V. Analysis of the probability of windfall occurrence on the territory of the Republic of Belarus 551

Mikanovich D.S., Kurskiy I.A., Kazutin E.G. Forecasting emergency situations at technical reservoirs 562

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

Kuznetsova M.A., Zaripova S.N. Statement of the problem of substantiating a rational option for staffing territorial divisions of state fire supervision of the EMERCOM of Russia with personnel 570

Rules of submitting articles for publication 584

CHEMICAL STRATEGIES FOR FIREPROOFING POROUS FLAMMABLE MATERIALS: ADVANCES, APPLICATIONS, AND ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS

Le Anh Tuan, Phan Anh, Nguyen Thi Ngoc Anh, Do Ngoc Bich, Nguyen Huu Hieu

Purpose. This paper provides a comprehensive overview of the chemical strategies used for fireproofing porous flammable materials. It aims to synthesize recent advances, outline key mechanisms of action, and evaluate the environmental and health implications of different flame retardant classes. The work addresses the urgent need for balancing fire safety with sustainability and regulatory compliance.

Methods. A systematic review of peer-reviewed research, standards, and technical reports from 2018 to 2024 was conducted. Data sources included scientific journals, regulatory documents, and industry guidelines. The analysis covered halogenated and halogen-free flame retardants, nanostructured systems, bio-based chemicals, and hybrid approaches. Special focus was given to studies employing advanced characterization techniques, cone calorimetry, thermal analysis, and life cycle assessment.

Findings. Halogenated flame retardants remain effective but are increasingly restricted due to toxicity and environmental persistence. Halogen-free alternatives, such as ammonium polyphosphate, aluminum diethyl phosphinate, DOPO¹ derivatives, and bio-based systems, show promising performance, especially when combined with nanomaterials or reactive chemistries to enhance stability. Innovative solutions, including metal-organic frameworks, graphene derivatives, and phytic acid-based coatings, are emerging for improved efficacy and lower ecological footprint. However, scalability, cost, and long-term durability remain challenges. The porosity of materials introduces specific issues such as leaching and off-gassing, necessitating careful selection and application methods. Regulatory frameworks like REACH² and the Stockholm Convention³ play a decisive role in guiding safer chemical adoption.

Application field of research. Developing safer and more sustainable fire protection strategies in the age of advanced materials and growing ecological awareness.

Keywords: fire retardants, porous materials, halogen-free flame retardants, nanomaterials, environmental safety.

(The date of submitting: May 11, 2025)

1. Introduction

Porous flammable materials play a central role in modern industrial applications due to their unique combination of lightweight structure, insulation capabilities, and design flexibility. Found in products ranging from furniture foams, packaging materials, and insulation boards to wearable fabrics, natural wood, paper, and high-performance polymeric aerogels, these materials are often selected for their functionality and efficiency. However, one of the most critical vulnerabilities of porous materials is their susceptibility to fire. The very features that make them desirable – high porosity, low thermal conductivity, and high surface area – also make them inherently more combustible and capable of propagating flames rapidly once ignited [1].

The behavior of porous materials under fire conditions is distinct from that of dense or compact materials. Their interconnected pore structures allow for the easy diffusion of air (oxygen), volatile gases, and heat, which accelerates ignition and combustion. Once initiated, fire spreads quickly within the porous network, releasing smoke, toxic gases, and potentially lethal heat [1]. This presents a considerable risk not only in domestic and commercial environments but also in

¹ 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) is an organophosphorus compound that is used to produce fire retardants.

² Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) – Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006.

³ Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants is an international environmental treaty, signed on 22 May 2001 and effective from 17 May 2004, that aims to eliminate or restrict the production and use of persistent organic pollutants.

critical sectors such as transportation, aerospace, defense, and construction. For instance, in residential buildings, upholstered furniture and insulation foams are often involved in early fire development stages due to their porous and flammable nature. In aircraft interiors, composite foams must meet strong fire safety regulations to prevent disaster in the event of electrical faults or engine overheating [2].

Given these risks, substantial efforts have been invested in enhancing the fire resistance of porous flammable materials. While physical barriers such as metal cladding or fire-resistant fabrics can offer some protection, these methods are often limited in effectiveness, flexibility, and cost-efficiency. In contrast, chemical fireproofing – using substances that interrupt the combustion process through thermal, physical, or chemical means – provides a versatile and effective solution. Chemical fire retardants can be tailored to operate through various mechanisms, such as absorbing heat, releasing water or inert gases, promoting char formation, or interfering with flame-propagating radicals [1]. Moreover, they can be applied through multiple techniques including impregnation, surface coating, and chemical bonding, making them compatible with different types of porous substrates.

The challenge, however, lies in balancing fire performance with environmental and mechanical considerations. Traditional flame retardants, particularly halogenated compounds, have come under increasing scrutiny due to their toxicity, persistence in the environment, and potential for bioaccumulation [3; 4]. These concerns have led to regulatory restrictions and the development of safer, halogen-free alternatives. Furthermore, many flame retardants affect the mechanical properties, processability, and durability of the materials to which they are added. For example, mineral-based retardants require high loading levels that can compromise structural integrity, while some reactive phosphorus-based compounds may cause discoloration or surface degradation over time [5].

As a result, the field of chemical fireproofing is evolving rapidly, with a growing focus on multifunctional systems that not only resist combustion but also preserve or enhance the performance of the host material. Nanotechnology and material science innovations have introduced a new generation of flame retardants, including layered silicates, carbon-based nanostructures like graphene, and hybrid materials such as metal-organic frameworks (MOFs) [3]. These substances offer the potential for improved dispersion, greater efficiency at lower loadings, and added functionalities such as thermal conductivity, mechanical reinforcement, and even antimicrobial properties. Biobased flame retardants derived from natural polymers, DNA, and other renewable sources are also being explored as eco-friendly alternatives [6; 7].

This review aims to provide a comprehensive, critical analysis of chemical fireproofing methods applicable to porous flammable materials. In the sections that follow, we delve into the classification of fire retardants by their chemical mechanism and mode of action, examine application techniques specific to porous structures, and discuss the latest research developments including nanomaterial-enhanced and biobased systems. We also evaluate the environmental and regulatory landscape shaping the adoption and development of these technologies. Our goal is to offer insights that inform both academic research and industrial implementation, contributing to safer, more sustainable fire protection strategies in the age of advanced materials and growing ecological awareness.

2. Classification of fire-retardant chemicals and mechanisms

Fire retardants can be broadly categorized based on their chemical composition and mechanisms of action. Their ability to inhibit, suppress, or delay combustion varies depending on their interactions with the thermal degradation pathways of the host material. The six major groups discussed here are mineral-based additives, organophosphorus compounds, halogenated substances, intumescent systems, graphene-based nanomaterials, and MOFs [8–11].

2.1. Mineral-based endothermic additives. Mineral fillers are inorganic particulate materials added to polymers or composites to improve mechanical and thermal properties, reduce cost, and enhance flame retardancy. They such as aluminum hydroxide and magnesium hydroxide are among the most widely used fire retardants. Their primary function is to undergo endothermic decomposition upon heating, releasing water vapor that dilutes combustible gases and absorbs heat from the system [12]. The resulting residue forms a protective barrier that limits further pyrolysis. The flame-retardant mechanism of Mineral fillers have shown in Figure 1. The flame-retardant mechanism of aluminum hydroxide starts decomposing around 180 °C, while magnesium hydroxide functions at slightly higher temperatures (~300 °C), making each suitable for different polymer systems. For porous foams and insulation materials, these mineral fillers are often integrated into

the polymer matrix at high loadings (typically 40–60 % by weight), which can compromise mechanical properties like flexibility and tensile strength [13]. Despite this drawback, mineral-based fire retardants are favored for their non-toxicity, low smoke emission, and environmental friendliness. They are commonly used in rigid polyurethane (PU) foams, ethylene-vinyl acetate composites, and wood-plastic composites [14].

2.2. Organophosphorus compounds. Organophosphorus flame retardants (OPFRs) are widely used in both halogen-free and intumescent systems due to their dual action in the condensed and gas phases, this has been demonstrated by both experimental and theoretical calculations [15]. In the condensed phase, they promote char formation by catalyzing dehydration reactions, whereas in the gas phase, they scavenge flame-propagating radicals (e.g., OH· and H·) [1]. The flame-retardant mechanism of OPFRs is presented in Figure 2a. Ammonium polyphosphate (APP), triphenyl phosphate, and aluminum diethyl phosphinate (AIPi) are notable examples. APP is especially popular in intumescent coatings used for porous wooden substrates, where it supports foamed char development under heat [3; 4]. AIPi is often used in thermoplastics and foamed polyamides due to its thermal stability and low volatility. A significant advantage of OPFRs is their relatively low environmental toxicity compared to halogenated systems. However, their potential for migration from porous matrices and their interaction with humidity can reduce long-term durability. Encapsulation and grafting techniques are being explored to mitigate these issues [4].

2.3. Halogenated flame retardants (HFRs), particularly brominated and chlorinated compounds, function by releasing halogen radicals during combustion. These radicals intercept the combustion chain reaction by neutralizing high-energy flame radicals. The flame-retardant mechanism of HFRs is presented in Figure 2b. Tetrabromobisphenol A and decabromodiphenyl ether have historically been used in foamed insulation and upholstered furniture [3]. While HFRs are highly effective at low loadings, their environmental impact has led to widespread regulatory scrutiny. They have been associated with endocrine disruption, persistent organic pollutants behavior, and bioaccumulation [16]. The European Union and U.S. Environmental Protection Agency have listed several HFRs under restriction due to these concerns. Their use in porous materials is declining in favor of halogen-free alternatives, but legacy applications and recycling challenges continue to pose risks. Moreover, combustion of HFR-treated materials often leads to the formation of toxic gases like hydrogen bromide, posing serious risks during fires [17].

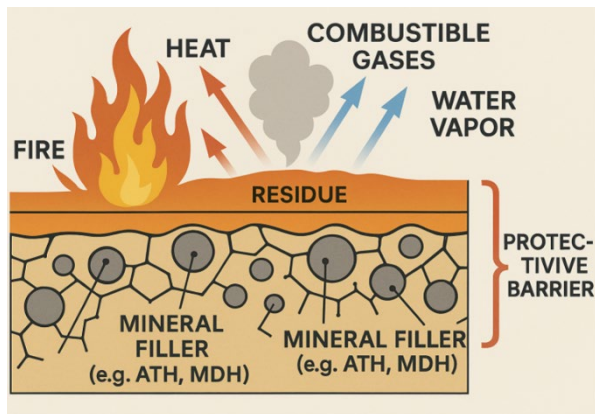


Figure 1. – The flame-retardant mechanism of Mineral fillers

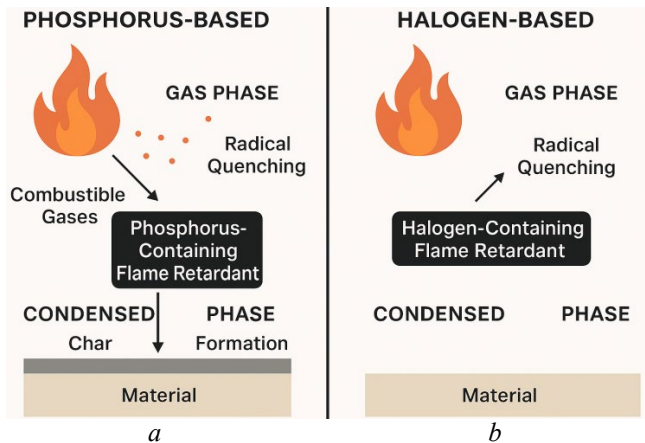


Figure 2. – The flame-retardant mechanism of OPFRs (a) and HFRs (b)

2.4. Intumescent flame retardants (IFRs) form a swollen, thermally insulating char layer when exposed to fire. Typically comprising an acid source (e.g., APP), a carbon source (e.g., pentaerythritol), and a blowing agent (e.g., melamine), these systems are particularly effective for porous wood and cellulose-based materials [4]. The mechanism involves the acid catalyzing dehydration of the carbon source while the blowing agent generates inert gases, expanding the matrix into a foamed char. This barrier protects the underlying material from heat and oxygen. The flame-retardant mechanism of IFRs have shown in Figure 3. IFRs can be applied as surface coatings or embedded within porous foams using impregnation techniques. Recent advancements have focused on enhancing the mechanical durability and water resistance of IFR coatings through cross-linking agents and hybrid nanofillers such as layered double hydroxides and graphene oxide [18].

2.5. Graphene-based fire retardants. Graphene and its oxidized form, graphene oxide, offer promising fire retardant properties due to their high aspect ratio, mechanical strength, and

ability to form dense, impermeable layers that hinder heat and gas transfer [1]. When incorporated into porous polymeric systems via spray coating or layer-by-layer (LBL) assembly, graphene acts as a barrier to volatile degradation products and external oxygen. It also promotes graphitization of the char, increasing thermal stability [3]. The flame-retardant mechanism of graphene is illustrated in Figure 4. Graphene-based systems are often used in synergy with conventional flame retardants to lower overall loading levels. However, dispersion challenges and high production costs remain barriers to widespread adoption. Ongoing research is exploring functionalized graphene and eco-friendly exfoliation methods to overcome these limitations [6].

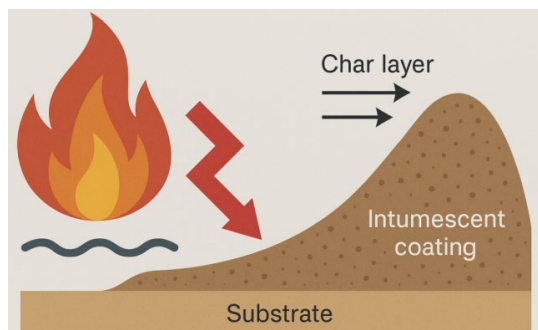


Figure 3. – The flame-retardant mechanism of IFRs

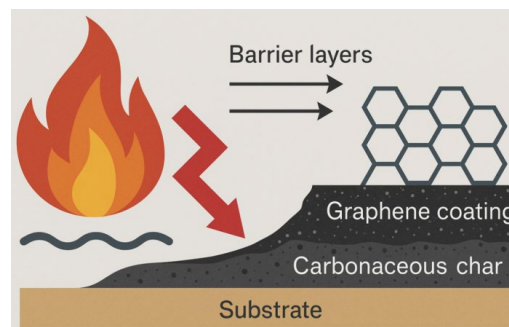


Figure 4. – The flame-retardant mechanism of Graphene

2.6. Metal-organic frameworks (MOFs) are crystalline hybrid materials composed of metal ions and organic ligands that form porous networks. Their tunable structure allows for the integration of fire retardant functionality via gas-phase radical capture, catalytic charring, or synergistic action with other retardants [2]. Recent studies have shown that incorporating MOFs into PU foams can reduce the peak heat release rate and delay ignition. Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) and MIL-series MOFs are particularly promising due to their high thermal stability and ability to adsorb decomposition gases [19]. The flame-retardant mechanism of MOFs is illustrated in Figure 5. Challenges remain regarding the moisture sensitivity and scale-up of MOF production. However, their unique architecture and multifunctional performance have positioned MOFs as a frontier in next-generation flame retardancy for porous materials.

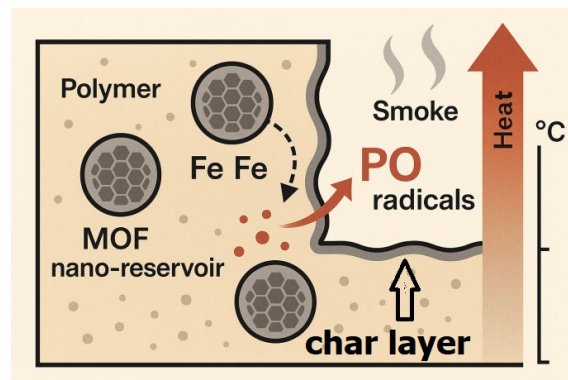


Figure 5. – The flame-retardant mechanism of MOFs

3. Application techniques for fire-retardant chemicals in porous materials

The performance of fire-retardant chemicals depends not only on their chemical structure and decomposition mechanism but also on the method of application to the porous material. Application techniques determine the depth of penetration, adhesion, long-term stability, and overall efficiency of the fire-retardant treatment. In porous flammable materials – such as foamed polymers, wood, textiles, and composite laminates – three major strategies are commonly used: impregnation, surface coating, and reactive incorporation. Each of these techniques presents its own set of advantages, limitations, and technological opportunities.

3.1. Impregnation methods. Impregnation involves the diffusion or forced penetration of fire-retardant solutions into the internal pore structure of the substrate. In wood products, this method is widely used in pressure-treatment processes, where chemicals such as borates or phosphate salts are driven deep into the wood under vacuum and pressure cycles [20]. This ensures long-lasting flame retardancy even when the surface is abraded or subject to mechanical wear. The effectiveness of impregnation depends heavily on the porosity, permeability, and hygroscopic nature of the substrate. Wood species with open grain structures, such as southern yellow pine, absorb treatment chemicals more uniformly compared to denser hardwoods. Cellulose-rich substrates, including paper insulation and cotton fabrics, also allow moderate penetration without significant structural degradation.

However, water-soluble fire retardants impregnated into porous structures often face challenges of leaching, especially in outdoor or high-humidity environments. Fire retardants based on ammonium salts, for instance, tend to migrate over time and lose effectiveness unless they are stabilized through polymeric encapsulation, sol-gel chemistry, or post-treatment curing [21]. As a result, current research is focused on hybrid impregnation systems that include both inorganic and organic binders to improve retention. In some advanced applications, supercritical CO₂ has been explored as a carrier for impregnating fire-retardant nanoparticles deep into porous foams and natural fibers. This approach offers excellent penetration while avoiding water-based swelling or distortion of the substrate. Moreover, it can be used to introduce multifunctional additives – such as UV absorbers and antimicrobial agents – alongside fire-retardant agents.

Table 1. – Summary of impregnation-based fire retardant treatments

Material type	Common chemicals used	Depth of penetration	Advantages	Limitations
Wood	Ammonium phosphate, boric acid	High	Uniform protection, deep reach	Susceptible to leaching
Cotton fabrics	Diammonium phosphate, urea mixes	Medium	Low cost, effective for textiles	Wash durability is low
Cellulose foams	Inorganic salts, silicates	Medium to high	Preserves texture	Moisture sensitivity, migration risk
Paper insulation	Borates, organophosphates	High	Lightweight, low-cost fire barrier	Requires lamination
Bio-based fibers	Modified starch + phytic acid	Medium	Sustainable, compostable	Durability under testing

3.2. Surface coatings. Surface coatings offer a straightforward method to apply flame-retardant chemicals directly onto porous substrates. They are especially suitable when the bulk properties of the material must remain unchanged or when high production throughput is required. Coatings may be applied via spraying, dipping, roll-to-roll processing, or brushing, depending on the scale and nature of the application [3]. The most widely used coatings are intumescent formulations that expand under heat to form insulating carbonaceous foams. These coatings are frequently applied to building insulation boards, wooden claddings, and foam-based insulation panels. However, the performance of such coatings is closely linked to the uniformity of coverage and thickness. Thin or poorly adhered coatings can crack or delaminate under fire exposure, compromising protection.

Recent developments have focused on the use of nanomaterials and hybrid coatings to improve fire resistance at the microscale. LBL assemblies, consisting of alternating polyelectrolyte and nanoplatelet layers, provide an exceptionally thin yet robust flame barrier. These are particularly beneficial for soft, flexible porous substrates like foams and textiles where bulk loading of flame retardants is impractical [3]. In addition to intumescent and LBL coatings, sol-gel techniques are also gaining attention. In these systems, a silica or alumina matrix is formed in situ to encapsulate the substrate in a ceramic-like layer. These coatings are advantageous for porous composite laminates or thermoset structures requiring long-term durability and resistance to weathering.

Table 2. – Comparison of coating types for porous substrates

Coating type	Mechanism	Suitable substrates	Fire performance	Durability factors
Intumescent coatings	Expand to form char barrier	Wood, textiles, polymers	Very good, depends on thickness	Susceptible to weathering
LBL nanocoatings	Barrier + radical scavenging	Foams, aerogels, fabrics	Excellent at nanoscale	Requires precision application
Sol-gel derived hybrids	Ceramic-like barrier formation	Thermoset composites	Moderate to high	High thermal stability
Silicone-elastomer films	Thermal shielding, flexibility	Flexible foams, wiring ducts	Good for mechanical stress	UV and aging resistance varies

A notable challenge in coating porous substrates lies in maintaining breathability and mechanical compliance. Overly rigid coatings may crack when the substrate is compressed or flexed. Researchers are investigating smart coatings that respond to stimuli such as heat or humidity by modifying their properties – such as softening to absorb impact or expanding more aggressively under thermal flux.

3.3. Reactive incorporation. In reactive incorporation, the flame-retardant chemical is covalently bonded to the polymer matrix during its synthesis. This method is highly desirable for porous polymeric foams, epoxy composites, and thermoset materials where additive migration would undermine long-term performance [5]. DOPO-based phosphonates and phosphinates are among the most commonly used reactive retardants. Their introduction during ring-opening or polyaddition polymerization allows them to become integral to the polymer backbone. This confers excellent thermal and mechanical stability, reduced smoke toxicity, and minimal impact on transparency or surface finish [5].

The use of reactive fire retardants is also being explored in combination with 3D printing and additive manufacturing of porous scaffolds. By embedding flame-retardant monomers in photocurable resins, researchers have fabricated lightweight, porous lattices with built-in flame resistance suitable for aerospace and biomedical applications [22–24]. Reactive systems, however, are typically more expensive and complex to formulate. They often require rigorous control of stoichiometry, pH, curing time, and catalyst presence. Additionally, once cured, these systems are difficult to recycle or reprocess, which may present a barrier in sustainability-conscious industries. In applications such as porous ceiling tiles, thermal insulation foam panels, and automotive interiors, hybrid strategies are emerging. These include combining reactive incorporation with outer coatings to provide both intrinsic and surface-level flame resistance. Multi-functional additives like silicon-phosphorus hybrids or phosphorus-nitrogen-silica networks are showing promise in this regard [23; 25]. In summary, the application technique for flame retardants in porous materials must be chosen with careful consideration of the target performance, substrate characteristics, environmental exposure, and manufacturing constraints. Table 3 below provides a consolidated summary of the techniques discussed in this section.

Table 3. – Summary of application methods for fire-retardant chemicals in porous materials

Method	Penetration depth, mm	Fire performance indicators*	Cost efficiency	Durability	Typical use cases
Impregnation	2–10 mm (medium to deep)	Flammability group: G2–G3; Ignition ability: B2; Independent combustion time: 30–60 s	Medium	Moderate	Wood panels, textiles, paper products
Surface coating	0.1–1 mm (shallow)	Flammability group: G2–G3; Ignition ability: B2; Independent combustion time: 20–40 s	High	Variable	Foam panels, fabrics, composite laminates
Reactive incorporation	Uniform through matrix	Flammability group: G1; Ignition ability: B1; Independent combustion time: ≤ 10 s	Low to medium	Very high	PU foams, epoxy boards, electronics

Note. * – Fire performance indicators are aligned with classifications from Russian GOST 30244-94⁴, GOST 30402-96⁵ and GOST 12.1.044-89⁶. In this context, the flammability group is referenced according to GOST 30244-94, the ignitability is referenced according to GOST 30402-96, and the independent combustion time is referenced according to GOST 12.1.044-89.

– «Flammability group» (G1–G4) ranks materials from low to high combustibility; «Ignition ability» (B1–B3) indicates ease of ignition; «Independent combustion time» measures self-sustained burning duration after flame removal.

– Values shown are typical ranges and may vary depending on substrate porosity, chemical formulation, and curing process.

By combining and customizing these methods, modern fire-retardant systems are achieving better integration with porous materials, higher multifunctionality, and longer service life – marking a significant advance in the field of passive fire protection [1; 26; 27].

4. Emerging technologies in fire retardancy for porous materials

As the demand for environmentally friendly, multifunctional, and high-performance fireproofing solutions grows, the field of flame retardancy is shifting toward the integration of advanced materials and new chemical architectures. Porous flammable substrates – due to their complexity and variety – benefit significantly from innovations that extend beyond traditional additive systems.

⁴ GOST 30244-94. Building materials. Methods for combustibility test. – Ministry of Construction of Russia, 1996.

⁵ GOST 30402-96. Building materials. Ignitability test method. – Ministry of Construction of Russia, 1996.

⁶ GOST 12.1.044-89. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. – USSR, 1991.

This section examines some of the most promising emerging technologies, with a focus on nanotechnology, hybrid composites, biobased retardants, and intelligent flame-resistant systems. We also present comparative data in two comprehensive tables to clarify the properties, functions, and future potential of these innovations.

4.1. Graphene-based and 2D nanomaterial composites. Graphene and related two-dimensional nanomaterials such as boron nitride, graphene oxide, montmorillonite clays and MXenes⁷ are at the forefront of nanotechnology-driven flame retardancy. These nanostructures possess exceptional thermal stability, high surface area, and the ability to form continuous barrier layers that impede heat, oxygen, and volatile products during combustion [1; 13]. A representative example is graphene oxide and its modified derivatives. When integrated into porous polymer foams, they form compact networks that reduce flammability and thermal conductivity while also enhancing mechanical [28]. These materials are ideal for aerospace, automotive, and construction foams that require both strength and fire protection [1; 29].

Table 4. – Properties of selected 2D nanomaterials for flame retardancy

Material	Key properties	Flame retardant role	Compatibility
Graphene	High surface area, conductive, barrier-forming	Physical shield, char reinforcement	PU foams, epoxy
MXene	Thermal conductive, tunable chemistry	Heat dissipation, synergist	Thermoplastics, PU
Montmorillonite clay	High aspect ratio, ionic exchange capacity	Smoke suppression, intumescence	Fabrics, composites
Boron nitride nanosheets	Thermal insulation, oxidation resistance	Delay degradation, suppress heat	Electronic foams

Incorporating 2D materials requires dispersion strategies to avoid aggregation. Surface functionalization (e.g., silane or carboxylation) improves compatibility with polymer matrices. Several recent studies show that even 1–3 wt% of functionalized graphene or MXene can dramatically reduce peak heat release rates and increase time to ignition [3].

4.2. MOFs and hybrid metal–organic networks. MOFs represent a class of crystalline materials formed by coordinating metal ions with organic ligands. Their highly porous structures and tunable chemistry make them effective for catalyzing char formation, scavenging radicals, and enhancing thermal resistance [2]. When embedded in porous polymers such as PU, MOFs enhance flame retardancy through multiple pathways: 1) promoting early char formation; 2) releasing inert gases; 3) acting as sacrificial shields during decomposition [8]. Recent innovations include integrating MOFs with phosphorus or nitrogen elements to improve their compatibility and performance in foamed matrices [30]. Table 5 illustrates that different MOFs exhibit various flame-retardant effects in porous polymers, such as catalyzing char formation, releasing inert gases, scavenging radicals, and delaying heat release. These MOFs demonstrate strong synergistic interactions with complementary additives like APP, graphene oxide, or phytic acid, thereby enhancing flame-retardant performance across a range of substrate materials including polyurethane foams, epoxy resins, and polyesters.

Table 5. – MOFs for flame retardancy in porous polymers

MOF type	Flame retardant effect	Synergistic components	Target material
ZIF-8	Char catalyst, gas release	APP, AlPi	PU foams
MIL-101(Fe)	Smoke suppression, heat delay	Graphene oxide, DOPO	Epoxy/PU composites
UiO-66-NH2	Radical scavenger, crosslinking	Phytic acid, nitrogen polymers	Polyesters, PU coatings

Though highly effective, MOFs often face issues of moisture sensitivity and high synthesis costs. Researchers are now working on scalable synthesis and hybridizing MOFs with biopolymers to mitigate environmental concerns [12].

4.3. Biobased and Eco-Friendly Flame Retardants. Environmental regulations and increasing awareness of chemical toxicity have accelerated the development of bio-based flame retardants derived from renewable natural resources. These materials aim to replace halogenated or

⁷ MXenes are a class of two-dimensional inorganic compounds, that consist of atomically thin layers of transition metal carbides, nitrides, or carbonitrides.

petroleum-based flame retardants, which often pose environmental persistence and toxicity concerns. Representative examples include phytic acid, commonly extracted from rice bran or other plant seeds, DNA obtained from marine biomass such as fish sperm, lignin sourced from cellulosic biomass and pulping residues, and casein, a milk-derived protein [31]. These biopolymers and biomolecules are intrinsically rich in phosphorus, nitrogen, and sometimes sulfur, allowing them to act as multi-functional flame retardants [32; 33]. During combustion, they can promote char formation, release non-flammable gases such as water vapor and ammonia, and dilute flammable volatiles, thereby reducing heat and smoke generation [6]. Moreover, their biodegradability and low toxicity align well with the principles of green chemistry and circular materials engineering. For porous substrates such as cotton fabrics, wood, and bio-based polymer foams, these natural flame retardants can be integrated through impregnation (soaking), LbL self-assembly, or covalent reactive grafting to form protective, intumescent coatings. However, despite their environmental advantages, challenges remain in achieving long-term durability, washing resistance, and mechanical integrity, particularly under humid or high-temperature conditions. Ongoing research is therefore focused on crosslinking strategies, hybridization with inorganic nanoparticles, and surface modification techniques to enhance the stability and practical applicability of these promising green flame-retardant systems.

4.4. Smart and stimuli-responsive flame retardants. Next-generation flame retardants are being designed with intelligent response behaviors. These systems undergo structural or phase changes when triggered by heat, UV light, or pH [34; 35]. One emerging class is the polymer-particle hydrogel that expands into a porous flame-retardant dome when heated, offering temporary but robust insulation during wildfires [20]. These systems hold promise for protecting structures in extreme conditions – such as aerospace re-entry, battery fires, or wildland-urban interfaces. Some experimental approaches are also exploring shape-memory intumescent coatings and phase-changing protective foams [36–38]. In summary, the landscape of flame retardants for porous materials is rapidly advancing through nanotechnology, green chemistry, and intelligent design. Each of these emerging systems introduces new functionalities beyond mere flame suppression, such as structural reinforcement, environmental safety, or fire sensing.

5. Environmental and health considerations of fire retardant chemicals

The application of chemical fire retardants has indisputably contributed to fire safety across a vast range of industrial and domestic settings. However, their deployment, especially in porous flammable materials, raises complex environmental and health challenges that are increasingly difficult to ignore. Porous materials, by virtue of their microstructure, not only absorb flame retardants deeply but also provide pathways for the long-term emission, degradation, and migration of these chemicals into surrounding environments [39; 40]. This has led to growing concerns about toxicity, persistence, bioaccumulation, and unintended human and ecological exposure.

One of the most pressing concerns in the use of fire retardants involves halogenated compounds, particularly polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and tetrabromobisphenol A. These compounds have been widely used for decades due to their high flame-retardant efficiency, particularly in polyurethane foams, electronics, and textiles [21; 41–43]. However, extensive toxicological studies have linked PBDEs to a range of adverse health outcomes, including neurotoxicity, endocrine disruption, reproductive disorders, and developmental issues in children [13; 43]. Their lipophilicity and environmental persistence make them prone to bioaccumulation, allowing them to travel through the food chain and persist in human tissues over extended periods. In indoor environments where porous materials are used – such as mattresses, upholstered furniture, and acoustic panels – PBDEs can gradually escape as vapor or attach to airborne particles and dust, leading to chronic low-dose exposure through inhalation or ingestion, particularly among infants and children [18].

Compared to their halogenated counterparts, halogen-free flame retardants like AlPi, APP, and DOPO-based derivatives offer a more favorable environmental and health profile. These compounds typically break down into less toxic byproducts and are not prone to bioaccumulation. For example, APP, widely used in intumescent coatings, decomposes into polyphosphoric acid and water [44], forming a stable char that insulates the material beneath while avoiding the release of toxic gases or smoke [45]. Similarly, DOPO-based reactive agents, when integrated into epoxy or polyester matrices, have shown minimal migration potential due to their covalent bonding within the polymer backbone [5; 6]. Still, the classification of halogen-free retardants as «safe» can be mis-

leading. Several organophosphorus-based compounds exhibit aquatic toxicity at certain concentrations or may form undesirable degradation products under high heat, particularly when used in open, porous structures exposed to humidity or mechanical wear.

To support this analysis, Table 6 presents a comparative evaluation of several commonly used flame retardants across key environmental and toxicological parameters, including human toxicity, environmental persistence, bioaccumulation potential, and their relative safety profiles when applied to porous substrates.

Table 6. – Comparative environmental and health profiles of selected flame retardants

Flame retardant	Classification	Human toxicity	Environmental persistence	Bioaccumulative	Remarks
PBDEs	Halogenated	High	High	Yes	Banned in EU; still found in old foams
Tetrabromobisphenol A	Halogenated	Moderate	Medium	Possible	Still used in electronics
APP	Halogen-free	Low	Low	No	Common in intumescent systems
AlPi	Halogen-free	Low to moderate	Low	No	Used in thermoplastics
DOPO derivatives	Halogen-free	Low	Low	No	Chemically bonded to matrix
Phytic acid (biobased)	Halogen-free	Very low	Biodegradable	No	Sustainable alternative

The porosity of a material significantly influences the behavior of fire retardants in environmental contexts. Unlike nonporous materials, porous substrates such as foams, wood composites, nonwoven fabrics, and cellulose-based insulation have larger surface-to-volume ratios and open channels that promote capillary movement [1; 46]. When these materials are treated with water-soluble fire retardants like borates or phosphate salts, the chemicals are at risk of leaching due to exposure to rain, cleaning processes, or even ambient humidity. Over time, this not only reduces fire resistance but also facilitates the transport of chemicals into soil and water systems, potentially contaminating local ecosystems [30]. On the other hand, more hydrophobic or encapsulated formulations have been developed to mitigate such issues. For instance, microencapsulation techniques now allow for embedding fire retardants in polymeric shells, releasing the active agents only under elevated temperatures. This controlled-release strategy helps to minimize environmental release during normal use and ensures functionality only in the event of fire [47; 48].

Despite these technological advances, the need for comprehensive lifecycle assessments of fire retardant-treated porous products is greater than ever. Lifecycle assessments consider the environmental impacts of a product from raw material extraction to disposal. For fire retardants, this includes emissions during production, potential release during product use, end-of-life treatment (e.g., incineration or landfilling), and recycling constraints [49]. For instance, brominated retardants in foamed plastics create major barriers to recycling because they contaminate melt streams and can lead to toxic byproducts during thermal processing [50; 51]. Furthermore, materials that incorporate chemically reactive or crosslinked retardants are often non-recyclable, prompting concerns about long-term sustainability [52].

In response to these concerns, regulatory frameworks across the globe have become increasingly strict. The European Union's REACH regulation mandates rigorous evaluation of chemical safety, resulting in the banning or phase-out of several high-risk flame retardants such as decabromodiphenyl ether and hexabromocyclododecane (HBCD) [53; 54]. Meanwhile, the Stockholm Convention – a global environmental treaty – has classified PBDEs and HBCD as persistent organic pollutants, leading to their elimination or severe restriction in many signatory countries [55; 56]. In the California's TB117-2013⁸ regulation marked a major shift by eliminating the requirement for furniture to pass an open flame test, thereby enabling manufacturers to reduce or eliminate HFR use without compromising fire safety [16; 17].

Alongside regulatory restrictions, green certification programs have emerged as influential drivers for the adoption of safer fire retardant technologies. Programs such as *GREENGUARD*, *Blue Angel*, and *Cradle to Cradle Certified* assess the chemical emissions of materials and their potential

⁸ Technical Bulletin 117-2013. Requirements, test procedure and apparatus for testing the smolder resistance of materials used in upholstered furniture. – United States, California, Department of Consumer Affairs, 2013.

impacts on indoor air quality, resource safety, and material reuse [57–59]. Products incorporating halogen-free or reactive flame retardants that demonstrate low emissions and safe end-of-life processing are more likely to meet these standards, thus gaining broader market acceptance in sustainability-driven industries such as green building and consumer products.

Table 7. – Summary of regulatory and certification frameworks related to flame retardants

Framework/Standard	Region	Focus area	Impact on flame retardant use
REACH	European Union	Chemical safety, registration	Bans many halogenated flame retardants
Stockholm Convention	Global	Persistent organic pollutants	Restricts PBDEs, HBCD, promotes safe alternatives
TB117-2013	California, USA	Flammability standard	Supports halogen-free compliance for furniture
GREENGUARD	Global	Indoor air quality	Encourages low-emission flame retardants
Cradle to Cradle Certified™	Global	Product lifecycle safety	Rewards safer chemistry and recyclability
Blue Angel (Der Blaue Engel)	Germany	Eco-label for products	Restricts toxic additives in consumer goods

Table 7 demonstrates that regulatory frameworks and certification programs play a crucial role in guiding the development and adoption of safer and more environmentally friendly flame retardants. These frameworks not only impose regulatory pressure but also shape innovation trends in flame-retardant materials toward safer, low-emission, and more sustainable solutions, thereby promoting the transition toward green chemistry and a circular economy within the materials industry.

6. Conclusion

The fireproofing of porous flammable materials using chemical flame retardants is a critical field of study that blends chemistry, materials engineering, toxicology, and environmental science. Throughout this review, we have explored a wide range of chemical classes – from halogenated and halogen-free systems to advanced nanostructured and bio-based flame retardants – and analyzed their modes of action, application methods, performance profiles, and environmental implications.

In particular, halogenated flame retardants, while historically effective, are now under global scrutiny for their toxicological effects and persistence in ecosystems. In contrast, halogen-free compounds such as ammonium polyphosphate, aluminum diethyl phosphinate, and DOPO derivatives show promise as safer alternatives, particularly when used in synergy with nanomaterials or reactive polymers that reduce their migration and leaching. Moreover, surface treatments, impregnations, and chemical grafting tailored to porous structures are proving essential to enhance adhesion and long-term retention of flame retardants.

Recent innovations, including the integration of metal-organic frameworks, two-dimensional materials (e.g., graphene oxide, MXenes), and phytic acid-based biopolymers, offer exciting new directions. These systems promise not only superior flame retardancy but also lower ecological footprints. However, their industrial scalability, long-term durability, and regulatory acceptance remain challenges to be addressed.

Environmental and health concerns must remain at the center of flame retardant development. The porosity of materials amplifies issues like leaching, off-gassing, and human exposure, particularly in indoor applications. Regulatory frameworks like REACH and the Stockholm Convention, along with green certification programs, play an increasingly influential role in shaping safer chemical use. Lifecycle assessments should be routinely applied to ensure that materials remain safe not only during fire incidents but throughout production, use, and disposal.

As the industry moves toward circularity and carbon neutrality, future flame retardants must be inherently safe, high-performance, and sustainable. The path forward will depend on collaborative efforts between researchers, manufacturers, and regulators to ensure that porous materials can be effectively and responsibly protected against fire.

REFERENCES

1. Liu S., He M., Qin Q., Liu W., Liao L., Qin S. Expanded properties and applications of porous flameretardant polymers containing graphene and its derivatives. *Polymers*, 2024. Vol. 16, No. 14. Article 2053. DOI: 10.3390/polym16142053.

2. Hu J., Pan Y.-T., Zhou K., Song P., Yang R. A new way to improve the fire safety of polyurethane composites with the assistance of metal-organic frameworks. *RSC Applied Polymers*, 2024. Vol. 2, No. 6. Pp. 996–1012. DOI: 10.1039/D4LP00257A.
3. Huang Y., Jiang S., Liang R., Sun P., Hai Y., Zhang L. Thermal triggered insulating fireproof layers: A novel fire extinguishing MXene composites coating. *Chemical Engineering Journal*, 2020. Vol. 391. Article 123621. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123621.
4. Zhang Y., Huang Y., Li M.-C., Zhang S., Zhou W., Mei C., Pan M. Bioinspired, stable adhesive Ti_3C_2Tx MXene-based coatings towards fire warning, smoke suppression and VOCs removal smart wood. *Chemical Engineering Journal*, 2023. Vol. 452, part 4. Article 139360. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139360.
5. Cao J., Duan H., Zou J., Zhang J., Ma H. A bio based phosphorus containing co curing agent towards excellent flame retardance and mechanical properties of epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability*, 2021. Vol. 187. Article 109548. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109548.
6. Wang D., Wang Y., Li T., Zhang S., Ma P., Shi D., Chen M., Dong W. A bio-based flame-retardant starch based on phytic acid. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020. Vol. 8, No. 25. Pp. 10265–10274. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c03277.
7. Sykam K., Försth M., Sas G., Restás Á., Das O. Phytic acid: A bio-based flame retardant for cotton and wool fabrics. *Industrial Crops and Products*, 2021. Vol. 164. Article 113349. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113349.
8. Lyu P., Hou Y., Hu J., Liu Y., Zhao L., Feng C., Ma Y., Wang Q., Zhang R., Huang W., Ma M. Composites filled with metal organic frameworks and their derivatives: Recent developments in flame retardants. *Polymers*, 2022. Vol. 14, No. 23. Article 5279. DOI: 10.3390/polym14235279.
9. Yin Z., Jiang Z., Wu T. The development and application of contemporary phosphorus flame retardants: A review. *Frontiers in Materials*, 2025. Vol. 12. DOI: 10.3389/fmats.2025.1508000.
10. Fan T., Yan Z., Huang W., Feng W., Bai Y., Feng C., Wu F. A comprehensive review of contents, toxic effects, metabolisms, and environmental behaviors of brominated and organophosphorus flame retardants. *Journal of Hazardous Materials*, 2025. Vol. 496. Article 139428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139428.
11. Kung H.-C., Hsieh Y.-K., Huang B.-W., Cheruiyot N.K., Chang-Chien G.-P. An overview: Organophosphate flame retardants in the atmosphere. *Aerosol and Air Quality Research*, 2022. Vol. 22. Article 220148. DOI: 10.4209/aaqr.220148.
12. Hull T.R., Witkowski A., Hollingbery L. Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer Degradation and Stability*, 2011. Vol. 96, No. 8. Pp. 1462–1469. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006.
13. He S., Gao Y.-Y., Zhao Z.-Y., Huang S.-C., Chen Z.-X., Deng C., Wang Y.-Z. Fully biobased phytic acid–basic amino acid salt for flame retardant polypropylene. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021. Vol. 3, No. 3. Pp. 911–919. DOI: 10.1021/acsapm.0c01356.
14. Qin W., Zhang R., Fu Y., Chang J. Enhancing flame retardancy of poly(lactic acid) with a novel fully biobased flame retardant synthesized from phytic acid and cytosine. *Polymer International*, 2024. Vol. 73, No. 3. Pp. 213–222. DOI: 10.1002/pi.6583.
15. Qin C., Chen J., Ruan S., Liu F., Zhang L. Theoretical study on the effect of oxidation states of phosphorus flame retardants on their mode of action. *Polymer Degradation and Stability*, 2024. Vol. 223. Article 110735. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110735.
16. Understanding REACH. *Website of the European Chemicals Agency (ECHA)*. URL: <https://echa.europa.eu/regulations/reach/understanding-reach> (accessed: May 5, 2025).
17. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): website. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx> (accessed: May 5, 2025).
18. Price E.J., Covello J., Paul R., Wnek G.E. Tannic acid based super intumescent coatings for prolonged fire protection of cardboard and wood. *SPE Polymers*, 2021. Vol. 2, No. 2. Pp. 153–168. DOI: 10.1002/pls2.10043.
19. Chen Z., Yuan S., Xu X. Synergistic effect of amino-modified CoMOF and APP on improvement of fire safety in rigid polyurethane foam. *ACS Omega*, 2024. Vol. 10, No. 1. Pp. 892–903. DOI: 10.1021/acsomega.4c08026.
20. Mastalska-Popławska J., Wójcik Ł., Izak P. Applications of hydrogels with fire retardant properties – a review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2023. Vol. 105. Pp. 608–624. DOI: 10.1007/s10971-022-05991-x.
21. de Wit C.A. An overview of brominated flame retardants in the environment. *Chemosphere*, 2002. Vol. 46, No. 5. Pp. 583–624. DOI: 10.1016/S0045-6535(01)00225-9.
22. Shan J., Yang Z., Chen G., Hu Y., Luo Y., Dong X., Zheng W., Zhou W. Design and synthesis of free-radical/cationic photosensitive resin applied for 3D printer with liquid crystal display (LCD) irradiation. *Polymers*, 2020. Vol. 12, No. 6. Article 1346. DOI: 10.3390/polym12061346.

23. Naik D., Wazarkar K., Sabnis A. UV-curable flame-retardant coatings based on phosphorus and silicon containing oligomers. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019. Vol. 16. Pp. 733–743. DOI: 10.1007/s11998-018-0151-7.
24. Pellerin S., Samyn F., Duquesne S., Landry V. Preparation and characterisation of UV-curable flame retardant wood coating containing a phosphorus acrylate monomer. *Coatings*, 2022. Vol. 12, No. 12. Article 1850. DOI: 10.3390/coatings12121850.
25. Yang J., Liu H., Cai G., Jin H. Additive manufacturing and influencing factors of lattice structures: A review. *Materials*, 2025. Vol. 18, No. 7. Article 1397. DOI: 10.3390/ma18071397.
26. Li X., Xu K., Wu J., Pan Y.-T., Li X., He J., Yang R. Current states and future challenges of multifunctional flame-retardant polyurethane coatings. *RSC Applied Interfaces*, 2025. Vol. 2, No. 6. Pp. 1527–1536. DOI: 10.1039/D5LF00215J.
27. Li F.-F. Comprehensive review of recent research advances on flame-retardant coatings for building materials: Chemical ingredients, micromorphology, and processing techniques. *Molecules*, 2023. Vol. 28, No. 4. Article 1842. DOI: 10.3390/molecules28041842.
28. Cao Z.-J., Liao W., Wang S.-X., Zhao H.-B., Wang Y.-Z. Polyurethane foams with functionalized graphene towards high fire-resistance, low smoke release, superior thermal insulation. *Chemical Engineering Journal*, 2019. Vol. 361. Pp. 1245–1254. DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.176.
29. Priyadharshini A., Xavier J.R. Recent innovations in graphene-based nanocomposite coatings for enhanced flame retardancy in industrial applications. *Polymer Degradation and Stability*, 2025. Vol. 240. Article 111479. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2025.111479.
30. Chen M.-H., Ma W.-L. A review on the occurrence of organophosphate flame retardants in the aquatic environment in China and implications for risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2021. Vol. 783. Article 147064. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147064.
31. Guo Y., Zuo C., Liu Y., Chen X., Ren Y., Liu X. Construction of a fully bio-based intumescent flame retardant for improving the flame retardancy of polyacrylonitrile. *Polymer Degradation and Stability*, 2023. Vol. 214. Article 110385. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110385.
32. Chen M., Guo Q., Yuan Y., Li A., Lin B., Xiao Y., Xu L., Wang W. Recent advancements of bio-derived flame retardants for polymeric materials. *Polymers*, 2025. Vol. 17, No. 2. Article 249. DOI: 10.3390/polym17020249.
33. Liu Y., Zhang A., Cheng Y., Li M., Cui Y., Li Z. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants. *Polymer Testing*, 2023. Vol. 124. Article 108100. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100.
34. Lei Y., Chan Q.N., Xu L., Lee E.W.M., Lee Y.X., Agarwal V., Yeoh G.H., Wang W. Smart retardant materials for fire alarm systems: Integrating flame retardancy and early detection technologies. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025. Vol. 8. Article 112. DOI: 10.1007/s42114-024-01152-6.
35. Patel R., Chaudhary M.L., Patel Y.N., Chaudhari K., Gupta R.K. Fire-resistant coatings: advances in flame-retardant technologies, sustainable approaches, and industrial implementation. *Polymers*, 2025. Vol. 17, No. 13. Article 1814. DOI: 10.3390/polym17131814.
36. Bisht N., Vishwakarma J., Jaiswal S., Shivani, Patel K.K., Mishra A., Srivastava A.K., Dhand C., Dwivedi N. Shape memory polymer coatings for smart and sustainable systems. *Materials Today Chemistry*, 2025. Vol. 45. Article 102607. DOI: 10.1016/j.mtchem.2025.102607.
37. Fan W., Zhang Y., Li W., Wang W., Zhao X., Song L. Multi-level self-healing ability of shape memory polyurethane coating with microcapsules by induction heating. *Chemical Engineering Journal*, 2019. Vol. 368. Pp. 1033–1044. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.027.
38. Zhang X.Q., Ding R., Xu J., Ji A.-L., Zhang Y.-C., Fu J., Lv X., Yao L., Yang S.-Y., Mao Q.-G., Liang X., Liu J., Wang X. Infrared-responsive shape memory self-healing and fluorescent damage-indication anti-corrosion coatings for aluminum alloys. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2024. Vol. 21. Pp. 1431–1446. DOI: 10.1007/s11998-023-00905-0.
39. Cheng H., Luo H., Hu Y., Tao S. Release kinetics as a key linkage between the occurrence of flame retardants in microplastics and their risk to the environment and ecosystem: A critical review. *Water Research*, 2020. Vol. 185. Article 116253. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116253.
40. Shi S., Feng Q., Zhang J., Wang X., Zhao L., Fan Y., Hu P., Wei P., Bu Q., Cao Z. Global patterns of human exposure to flame retardants indoors. *Science of the Total Environment*, 2024. Vol. 912. Article 169393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169393.
41. Ohoro C.R., Adeniji A.O., Okoh A.I., Okoh O.O. Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems: A review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2021. Vol. 19. Pp. 1229–1247. DOI: 10.1007/s40201-021-00656-3.

42. Feiteiro J., Mariana M., Cairrão E. Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure. *Environmental Pollution*, 2021. Vol. 285. Article 117475. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117475.
43. Okeke E.S., Huang B., Mao G., Chen Y., Zhengjia Z., Qian X., Wu X., Feng, W. Review of the environmental occurrence, analytical techniques, degradation and toxicity of TBBPA and its derivatives. *Environmental Research*, 2022. Vol. 206. Article 112594. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112594.
44. Hansen-Bruhn I., Craig J.L., Hinge M., Hull T.R. Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application. *European Polymer Journal*, 2025. Vol. 223. Article 113644. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113644.
45. Shi X.-H., Luo H., Jing C.-Y., Shi H., Wang D.-Y. The preparation of ammonium polyphosphate@nickel/cobalt-layered double hydroxide and its application as flame retardant in thermoplastic polyurethane. *Polymer Degradation and Stability*, 2024. Vol. 230. Article 111013. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.111013.
46. Wang L., Lin X., Liu F., Lin P., Xiao H., Feng X., Wan C., Yang H. Flame-retardant aerogels and porous composites based on sustainable biomass polysaccharides: A review. *Journal of Building Engineering*, 2025. Vol. 112. Article 113806. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.113806.
47. Jiang Y., Yang H., Lin X., Xiang S., Feng X., Wan C. Surface flame-retardant systems of rigid polyurethane foams: An overview. *Materials*, 2023. Vol. 16, No. 7. Article 2728. DOI: 10.3390/ma16072728.
48. Huo S., Wang C., Hu Q., Liu S., Zhang Q., Liu Z. A facile strategy to fabricate an intumescent fire-retardant coating with improved fire resistance and water tolerance for steel structure. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2020. Vol. 17. Pp. 1401–1411. DOI: 10.1007/s11998-020-00360-1.
49. Li X., Xu Y., An X.-Y., Gong L., Wang R., Liu Z.-M. Eco-friendly and efficient flame retardant rigid polyurethane foam reinforced with lignin and silica aerogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025. Vol. 304, part 2. Article 140947. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140947.
50. Altarawneh M., Saeed A., Al-Harashsheh M., Dlugogorski B.Z. Thermal decomposition of brominated flame retardants (BFRs): Products and mechanisms. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019. Vol. 70. Pp. 212–259. DOI: 10.1016/j.peccs.2018.10.004.
51. Kajiwara N., Matsukami H., Malarvannan G., Chakraborty P., Covaci A., Takigami H. Recycling plastics containing decabromodiphenyl ether into new consumer products including children's toys purchased in Japan and seventeen other countries. *Chemosphere*, 2022. Vol. 289. Article 133179. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133179.
52. Zu H., Geng Z., Yang R. Design of covalent adaptable networks with intrinsic flame retardancy. *Polymer Bulletin*, 2024. Vol. 81. Pp. 10489–10532. DOI: 10.1007/s00289-024-05211-2.
53. Kemmlein S., Herzke D., Law R.J. Brominated flame retardants in the European chemicals policy of REACH – Regulation and determination in materials. *Journal of Chromatography A*, 2009. Vol. 1216, No. 3. Pp. 320–333. DOI: 10.1016/j.chroma.2008.05.085.
54. Sharkey M., Harrad S., Abou-Elwafa Abdallah M., Drage D.S., Berresheim H. Phasing-out of legacy brominated flame retardants: the UNEP Stockholm Convention and other legislative action worldwide. *Environment International*, 2020. Vol. 144. Article 106041. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106041.
55. de Boer J., Harrad S., Sharkey M. The European regulatory strategy for flame retardants – The right direction but still a risk of getting lost. *Chemosphere*, 2024. Vol. 347. Article 140638. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140638.
56. Akinrinade O.E., Agunbiade F.O., Alani R., Ayejuyo O.O. Implementation of the Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) in Africa – Progress, challenges, and recommendations after 20 years. *Environmental Science: Advances*, 2024. Vol. 3, No. 5. Pp. 623–634. DOI: 10.1039/D3VA00347G.
57. Wei G., Yu X., Fang L., Wang Q., Tanaka T., Amano K., Yang X. A review and comparison of the indoor air quality requirements in selected building standards and certifications. *Building and Environment*, 2022. Vol. 226. Article 109709. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109709.
58. Spengler L., Jepsen D., Zimmermann T., Wichmann P. Product sustainability criteria in ecolabels: A complete analysis of the Blue Angel with focus on longevity and social criteria. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020. Vol. 25. Pp. 936–946. DOI: 10.1007/s11367-019-01642-6.
59. Braungart M., McDonough W., Bollinger A. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 2007. Vol. 15, No. 13-14. Pp. 1337–1348. DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.08.003.

Copyright © 2025 Le Anh Tuan, Phan Anh, Nguyen Thi Ngoc Anh,

Do Ngoc Bich, Nguyen Huu Hieu

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

**Chemical strategies for fireproofing porous flammable materials:
advances, applications, and environmental considerations**

**Химические стратегии огнезащиты пористых огнеопасных материалов:
достижения, применение и экологические соображения**

Le Anh Tuan

Университет пожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Социалистической Республики Вьетнам,
факультет пожарной безопасности,
преподаватель

Адрес: ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
р-н Тхань Суан,
11400, Ханой, Вьетнам

Email: tuanla@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0000-0002-4171-9949

Le Anh Tuan

University of Fire Prevention and Fighting
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Fire Prevention Faculty, Lecturer

Address: 243 Khuat Duy Tien,
Thanh Xuan,
11400, Hanoi, Vietnam

Email: tuanla@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0000-0002-4171-9949

Phan Anh

Университет пожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Социалистической Республики Вьетнам,
факультет пожарной безопасности,
преподаватель

Адрес: ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
р-н Тхань Суан,
11400, Ханой, Вьетнам

Email: anhp@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0001-2983-3474

Phan Anh

University of Fire Prevention and Fighting
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Fire Prevention Faculty, Lecturer

Address: 243 Khuat Duy Tien,
Thanh Xuan,
11400, Hanoi, Vietnam

Email: anhp@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0001-2983-3474

Nguyen Thi Ngoc Anh

Университет пожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Социалистической Республики Вьетнам,
факультет фундаментальных наук
и иностранных языков, преподаватель

Адрес: ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
р-н Тхань Суан,
11400, Ханой, Вьетнам

Email: anhntn@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0009-7821-3616

Nguyen Thi Ngoc Anh

University of Fire Prevention and Fighting
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Faculty of Fundamental Science
and Foreign Language, Lecturer

Address: 243 Khuat Duy Tien,
Thanh Xuan,
11400, Hanoi, Vietnam

Email: anhntn@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0009-7821-3616

Do Ngoc Bich

Университет пожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Социалистической Республики Вьетнам,
факультет фундаментальных наук
и иностранных языков, преподаватель

Адрес: ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
р-н Тхань Суан,
11400, Ханой, Вьетнам

Email: bichdn@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0005-1423-9260

Do Ngoc Bich

University of Fire Prevention and Fighting
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Faculty of Fundamental Science
and Foreign Language, Lecturer

Address: 243 Khuat Duy Tien,
Thanh Xuan,
11400, Hanoi, Vietnam

Email: bichdn@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0009-0005-1423-9260

Нгуен Хыу Хиеу

Университет пожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Социалистической Республики Вьетнам,
факультет фундаментальных наук
и иностранных языков,
преподаватель-исследователь

Адрес: ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
р-н Тхань Суан,
100000, Ханой, Вьетнам

Email: hieunh@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0000-0002-6758-8094

Nguyen Huu Hieu

University of Fire Prevention and Fighting
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Faculty of Fundamental Science
and Foreign Language,
Lecturer and Researcher

Address: 243 Khuat Duy Tien,
Thanh Xuan,
100000, Hanoi, Vietnam

Email: hieunh@daihocpccc.edu.vn

ORCID: 0000-0002-6758-8094

ХИМИЧЕСКИЕ СТРАТЕГИИ ОГНЕЗАЩИТЫ ПОРИСТЫХ ОГНЕОПАСНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Ле Ань Туан, Фан Ань, Нгуен Тхи Нгок Ань, До Нгок Бич, Нгуен Хыу Хиеу

Цель. Обобщение последних достижений в области огнезащиты пористых горючих материалов, описание ключевых механизмов действия и оценка воздействия различных классов антипиренов на окружающую среду и здоровье. Работа посвящена насущной необходимости достижения баланса между пожарной безопасностью, устойчивым развитием и соблюдением нормативных требований.

Методы. Проведен систематический обзор рецензируемых исследований, нормативных документов, технических отчетов и отраслевых руководств за период с 2018 по 2024 г. Анализ охватывал галогенированные и безгалогеновые антипирены, наноструктурированные системы, биохимические вещества и гибридные подходы. Особое внимание уделялось исследованиям, в которых применялись передовые методы характеристики, конусная калориметрия, термический анализ и оценка жизненного цикла.

Результаты. Галогенированные антипирены остаются эффективными, но их применение все больше ограничивается из-за токсичности и воздействия на окружающую среду. Безгалогеновые альтернативы, такие как полифосфат аммония, диэтилфосфинат алюминия, производные DOPO и системы на основе биологического сырья, демонстрируют многообещающие результаты, особенно в сочетании с наноматериалами или реактивными химическими веществами, для повышения стабильности. Появляются инновационные решения, включая металлорганические каркасы, производные графена и покрытия на основе фитиновой кислоты, для повышения эффективности и снижения экологического следа. Однако масштабируемость, стоимость и долговечность остаются проблемами. Пористость материалов создает определенные проблемы, такие как выщелачивание и газовыделение, что требует тщательного выбора и применения методов. Такие нормативные акты, как регламент REACH Европейского союза и Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях, играют решающую роль в обеспечении более безопасного внедрения химических веществ.

Область применения исследований. Разработка более безопасных и устойчивых стратегий противопожарной защиты в эпоху современных материалов и растущей экологической сознательности.

Ключевые слова: антипирены, пористые материалы, безгалогенные антипирены, наноматериалы, экологическая безопасность.

(Поступила в редакцию 11 мая 2025 г.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, S. Expanded properties and applications of porous flameretardant polymers containing graphene and its derivatives / S. Liu, M. He, Q. Qin [et al.] // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 14. – Article 2053. – DOI: 10.3390/polym16142053.
2. Hu, J. A new way to improve the fire safety of polyurethane composites with the assistance of metal-organic frameworks / Hu J., Pan Y.-T., Zhou K. [et al.] // *RSC Applied Polymers*. – 2024. – Vol. 2, No. 6. – P. 996–1012. – DOI: 10.1039/D4LP00257A.
3. Huang, Y. Thermal triggered insulating fireproof layers: A novel fire extinguishing MXene composites coating / Y. Huang, S. Jiang, R. Liang [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 391. – Article 123621. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.123621.
4. Zhang, Y. Bioinspired, stable adhesive Ti₃C₂T_x MXene-based coatings towards fire warning, smoke suppression and VOCs removal smart wood / Y. Zhang, Y. Huang, M.-C. Li [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 452, part 4. – Article 139360. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.139360.
5. Cao, J. A bio based phosphorus containing curing agent towards excellent flame retardance and mechanical properties of epoxy resin / J. Cao, H. Duan, J. Zou [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. – 2021. – Vol. 187. – Article 109548. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109548.
6. Wang, D. A bio-based flame-retardant starch based on phytic acid / D. Wang, Y. Wang, T. Li [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 25. – P. 10265–10274. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c03277.

7. Sykam, K. Phytic acid: A bio-based flame retardant for cotton and wool fabrics / K. Sykam, M. Försth, G. Sas [et al.] // *Industrial Crops and Products*. – 2021. – Vol. 164. – Article 113349. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113349.
8. Lyu, P. Composites filled with metal organic frameworks and their derivatives: Recent developments in flame retardants / P. Lyu, Y. Hou, J. Hu [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – Article 5279. – DOI: 10.3390/polym14235279.
9. Yin, Z. The development and application of contemporary phosphorus flame retardants: A review / Z. Yin, Z. Jiang, T. Wu // *Frontiers in Materials*. – 2025. – Vol. 12. – DOI: 10.3389/fmats.2025.1508000.
10. Fan, T. A comprehensive review of contents, toxic effects, metabolisms, and environmental behaviors of brominated and organophosphorus flame retardants / T. Fan, Z. Yan, W. Huang [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2025. – Vol. 496. – Article 139428. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139428.
11. Kung, H.-C. An overview: Organophosphate flame retardants in the atmosphere / H.-C. Kung, Y.-K. Hsieh, B.-W. Huang [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. – Vol. 22. – Article 220148. – DOI: 10.4209/aaqr.220148.
12. Hull, T.R. Fire retardant action of mineral fillers / T.R. Hull, A. Witkowski, L. Hollingbery // *Polymer Degradation and Stability*. – 2011. – Vol. 96, No. 8. – P. 1462–1469. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006.
13. He, S. Fully biobased phytic acid–basic amino acid salt for flame retardant polypropylene / S. He, Y.-Y. Gao, Z.-Y. Zhao [et al.] // *ACS Applied Polymer Materials*. – 2021. – Vol. 3, No. 3. – P. 911–919. – DOI: 10.1021/acsapm.0c01356.
14. Qin, W. Enhancing flame retardancy of poly(lactic acid) with a novel fully biobased flame retardant synthesized from phytic acid and cytosine / W. Qin, R. Zhang, Y. Fu, J. Chang // *Polymer International*. – 2024. – Vol. 73, No. 3. – P. 213–222. – DOI: 10.1002/pi.6583.
15. Qin, C. Theoretical study on the effect of oxidation states of phosphorus flame retardants on their mode of action / C. Qin, J. Chen, S. Ruan [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. – 2024. – Vol. 223. – Article 110735. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110735.
16. Understanding REACH // Website of the European Chemicals Agency (ECHA). – URL: <https://echa.europa.eu/regulations/reach/understanding-reach> (date of access: 05.05.2025).
17. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): [website]. – URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx> (accessed: May 5, 2025).
18. Price, E.J. Tannic acid based super intumescent coatings for prolonged fire protection of cardboard and wood / E.J. Price, J. Covello, R. Paul, G.E. Wnek // *SPE Polymers*. – 2021. – Vol. 2, No. 2. – P. 153–168. – DOI: 10.1002/pls2.10043.
19. Chen, Z. Synergistic effect of amino-modified CoMOF and APP on improvement of fire safety in rigid polyurethane foam / Z. Chen, S. Yuan, X. Xu // *ACS Omega*. – 2024. – Vol. 10, No. 1. – P. 892–903. – DOI: 10.1021/acsomega.4c08026.
20. Mastalska-Popławska, J. Applications of hydrogels with fire retardant properties – a review / J. Mastalska-Popławska, Ł. Wójcik, P. Izak // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2023. – Vol. 105. – P. 608–624. – DOI: 10.1007/s10971-022-05991-x.
21. de Wit, C.A. An overview of brominated flame retardants in the environment / C.A. de Wit // *Chemosphere*. – 2002. – Vol. 46, No. 5. – P. 583–624. – DOI: 10.1016/S0045-6535(01)00225-9.
22. Shan, J. Design and synthesis of free-radical/cationic photosensitive resin applied for 3D printer with liquid crystal display (LCD) irradiation / J. Shan, Z. Yang, G. Chen [et al.] // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, No. 6. – Article 1346. – DOI: 10.3390/polym12061346.
23. Naik, D. UV-curable flame-retardant coatings based on phosphorus and silicon containing oligomers / D. Naik, K. Wazarkar, A. Sabnis // *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2019. – Vol. 16. – P. 733–743. – DOI: 10.1007/s11998-018-0151-7.
24. Pellerin, S. Preparation and characterisation of UV-curable flame retardant wood coating containing a phosphorus acrylate monomer / S. Pellerin, F. Samyn, S. Duquesne, V. Landry // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – Article 1850. – DOI: 10.3390/coatings12121850.
25. Yang, J. Additive manufacturing and influencing factors of lattice structures: A review / J. Yang, H. Liu, G. Cai, H. Jin // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, No. 7. – Article 1397. – DOI: 10.3390/ma18071397.
26. Li, X. Current states and future challenges of multifunctional flame-retardant polyurethane coatings / X. Li, K. Xu, J. Wu [et al.] // *RSC Applied Interfaces*. – 2025. – Vol. 2, No. 6. – P. 1527–1536. – DOI: 10.1039/D5LF00215J.
27. Li, F.-F. Comprehensive review of recent research advances on flame-retardant coatings for building materials: Chemical ingredients, micromorphology, and processing techniques / F.-F. Li // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28, No. 4. – Article 1842. – DOI: 10.3390/molecules28041842.

28. Cao, Z.-J. Polyurethane foams with functionalized graphene towards high fire-resistance, low smoke release, superior thermal insulation / Z.-J. Cao, W. Liao, S.-X. Wang [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 361. – P. 1245–1254. – DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.176.
29. Priyadharshini, A. Recent innovations in graphene-based nanocomposite coatings for enhanced flame retardancy in industrial applications / A. Priyadharshini, J.R. Xavier // *Polymer Degradation and Stability*. – 2025. – Vol. 240. – Article 111479. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2025.111479.
30. Chen, M.-H. A review on the occurrence of organophosphate flame retardants in the aquatic environment in China and implications for risk assessment / M.-H. Chen, W.-L. Ma // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 783. – Article 147064. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147064.
31. Guo, Y. Construction of a fully bio-based intumescent flame retardant for improving the flame retardancy of polyacrylonitrile / Y. Guo, C. Zuo, Y. Liu [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. – 2023. – Vol. 214. – Article 110385. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110385.
32. Chen, M. Recent advancements of bio-derived flame retardants for polymeric materials / M. Chen, Q. Guo, Y. Yuan [et al.] // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 2. – Article 249. – DOI: 10.3390/polym17020249.
33. Liu, Y. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants / Y. Liu, A. Zhang, Y. Cheng [et al.] // *Polymer Testing*. – 2023. – Vol. 124. – Article 108100. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100.
34. Lei, Y. Smart retardant materials for fire alarm systems: Integrating flame retardancy and early detection technologies / Y. Lei, Q.N. Chan, L. Xu [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2025. – Vol. 8. – Article 112. – DOI: 10.1007/s42114-024-01152-6.
35. Patel, R. Fire-resistant coatings: advances in flame-retardant technologies, sustainable approaches, and industrial implementation / R. Patel, M.L. Chaudhary, Y.N. Patel [et al.] // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – Article 1814. – DOI: 10.3390/polym17131814.
36. Bisht, N. Shape memory polymer coatings for smart and sustainable systems / N. Bisht, J. Vishwakarma, S. Jaiswal [et al.] // *Materials Today Chemistry*. – 2025. – Vol. 45. – Article 102607. – DOI: 10.1016/j.mtchem.2025.102607.
37. Fan, W. Multi-level self-healing ability of shape memory polyurethane coating with microcapsules by induction heating / W. Fan, Y. Zhang, W. Li [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 368. – P. 1033–1044. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.027.
38. Zhang, X.Q. Infrared-responsive shape memory self-healing and fluorescent damage-indication anti-corrosion coatings for aluminum alloys / X.Q. Zhang, R. Ding, J. Xu [et al.] // *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2024. – Vol. 21. – P. 1431–1446. – DOI: 10.1007/s11998-023-00905-0.
39. Cheng, H. Release kinetics as a key linkage between the occurrence of flame retardants in microplastics and their risk to the environment and ecosystem: A critical review / H. Cheng, H. Luo, Y. Hu, S. Tao // *Water Research*. – 2020. – Vol. 185. – Article 116253. – DOI: 10.1016/j.watres.2020.116253.
40. Shi, S. Global patterns of human exposure to flame retardants indoors / S. Shi, Q. Feng, J. Zhang [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2024. – Vol. 912. – Article 169393. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169393.
41. Ohoro, C.R. Polybrominated diphenyl ethers in the environmental systems: A review / C.R. Ohoro, A.O. Adeniji, A.I. Okoh, O.O. Okoh // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 19. – P. 1229–1247. – DOI: 10.1007/s40201-021-00656-3.
42. Feiteiro, J. Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure / J. Feiteiro, M. Mariana, E. Cairrão // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 285. – Article 117475. – DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117475.
43. Okeke, E.S. Review of the environmental occurrence, analytical techniques, degradation and toxicity of TBBPA and its derivatives / E.S. Okeke, B. Huang, G. Mao [et al.] // *Environmental Research*. – 2022. – Vol. 206. – Article 112594. – DOI: 10.1016/j.envres.2021.112594.
44. Hansen-Bruhn, I. Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application / I. Hansen-Bruhn, J.L. Craig, M. Hinge, T.R. Hull // *European Polymer Journal*. – 2025. – Vol. 223. – Article 113644. – DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113644.
45. Shi, X.-H. The preparation of ammonium polyphosphate@nickel/cobalt-layered double hydroxide and its application as flame retardant in thermoplastic polyurethane / X.-H. Shi, H. Luo, C.-Y. Jing [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. – 2024. – Vol. 230. – Article 111013. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.111013.
46. Wang, L. Flame-retardant aerogels and porous composites based on sustainable biomass polysaccharides: A review / L. Wang, X. Lin, F. Liu [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2025. – Vol. 112. – Article 113806. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.113806.
47. Jiang, Y. Surface flame-retardant systems of rigid polyurethane foams: An overview / Y. Jiang, H. Yang, X. Lin [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – Article 2728. – DOI: 10.3390/ma16072728.

48. Huo, S. A facile strategy to fabricate an intumescent fire-retardant coating with improved fire resistance and water tolerance for steel structure / S., Huo C. Wang, Q. Hu [et al.] // *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2020. – Vol. 17. – P. 1401–1411. – DOI: 10.1007/s11998-020-00360-1.
49. Li, X. Eco-friendly and efficient flame retardant rigid polyurethane foam reinforced with lignin and silica aerogel / X. Li, Y. Xu, X.-Y. An [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2025. – Vol. 304, part 2. – Article 140947. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140947.
50. Altarawneh, M. Thermal decomposition of brominated flame retardants (BFRs): Products and mechanisms / M. Altarawneh, A. Saeed, M. Al-Harashseh, B.Z. Dlugogorski // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2019. – Vol. 70. – P. 212–259. – DOI: 10.1016/j.peecs.2018.10.004.
51. Kajiwara, N. Recycling plastics containing decabromodiphenyl ether into new consumer products including children's toys purchased in Japan and seventeen other countries / N. Kajiwara, H. Matsukami, G. Malarvannan [et al.] // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 289. – Article 133179. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133179.
52. Zu, H. Design of covalent adaptable networks with intrinsic flame retardancy / H. Zu, Z. Geng, R. Yang // *Polymer Bulletin*. – 2024. – Vol. 81. – P. 10489–10532. – DOI: 10.1007/s00289-024-05211-2.
53. Kemmlein, S. Brominated flame retardants in the European chemicals policy of REACH – Regulation and determination in materials / S. Kemmlein, D. Herzke, R.J. Law // *Journal of Chromatography A*. – 2009. – Vol. 1216, No. 3. – P. 320–333. – DOI: 10.1016/j.chroma.2008.05.085.
54. Sharkey, M. Phasing-out of legacy brominated flame retardants: the UNEP Stockholm Convention and other legislative action worldwide / M. Sharkey, S. Harrad, M. Abou-Elwafa Abdallah [et al.] // *Environment International*. – 2020. – Vol. 144. – Article 106041. – DOI: 10.1016/j.envint.2020.106041.
55. de Boer, J. The European regulatory strategy for flame retardants – The right direction but still a risk of getting lost / J. de Boer, S. Harrad, M. Sharkey // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 347. – Article 140638. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140638.
56. Akinrinade, O.E. Implementation of the Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) in Africa – Progress, challenges, and recommendations after 20 years / O.E. Akinrinade, F.O. Agunbiade, R. Alani, O.O. Ayejuyo // *Environmental Science: Advances*. – 2024. – Vol. 3, No. 5. – P. 623–634. – DOI: 10.1039/D3VA00347G.
57. Wei, G. A review and comparison of the indoor air quality requirements in selected building standards and certifications / G. Wei, X. Yu, L. Fang [et al.] // *Building and Environment*. – 2022. – Vol. 226. – Article 109709. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109709.
58. Spengler, L. Product sustainability criteria in ecolabels: A complete analysis of the Blue Angel with focus on longevity and social criteria / L. Spengler, D. Jepsen, T. Zimmermann, P. Wichmann // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. – 2020. – Vol. 25. – P. 936–946. – DOI: 10.1007/s11367-019-01642-6.
59. Braungart, M. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design / M. Braungart, W. McDonough, A. Bollinger // *Journal of Cleaner Production*. – 2007. – Vol. 15, No. 13-14. – P. 1337–1348. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.08.003.

ПОЖАРЫ С УЧАСТИЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ

Пивоваров А.В., Лахвич В.В., Кобяк В.В., Казутин Е.Г.

Цель. Провести комплексный анализ пожаров с участием аккумуляторных электромобилей (BEV) на территории Республики Беларусь за период 2021–2025 гг., а также оценить особенности их развития и способы тушения.

Методы. Статистический анализ данных о парке электромобилей (EV) за период 2022–2024 гг. и о пожарах с участием BEV за 2021–2025 гг. включая предварительные данные за 2025 г.; сравнительный анализ эффективности существующих способов тушения высоковольтной литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи (тяговая АКБ).

Результаты. Установлен экспоненциальный рост парка EV в Республике Беларусь за период 2022–2024 гг. Определены доминирующие причины пожаров, ключевой из которых является термический разгон в литий-ионных тяговых АКБ, спровоцированный преимущественно короткими замыканиями (КЗ) вследствие механических повреждений или производственных дефектов. Установлена низкая эффективность тушения (охлаждения) тяговой АКБ с помощью традиционных стволов-пожарных. Выявлена необходимость применения специализированных тактик и технических средств для тушения тяговой АКБ, таких как: стволы-пробойники, высоковольтные контейнеры, огнезащитные полотна и др.

Область применения исследований. Результаты исследования предназначены для Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, производителей EV, страховых компаний, а также для разработки нормативных правовых актов в области пожарной безопасности EV.

Ключевые слова: пожары BEV, термический разгон, тушение EV, литий-ионные аккумуляторные батареи, высоковольтные системы, способы пожаротушения, пожарная безопасность электротранспорта.

(Поступила в редакцию 6 июня 2025 г.)

Введение

Активное развитие электротранспорта в Республике Беларусь, стимулируемое глобальной экологической повесткой и мерами государственной поддержки, сопровождается значительным ростом парка EV [1]. Этот рост неизбежно влечет новые вызовы в сфере пожарной безопасности, обусловленные специфическими рисками, связанными с эксплуатацией высоковольтных литий-ионных тяговых АКБ. Наиболее опасным процессом при возгорании литий-ионной тяговой АКБ является термический разгон (thermal runaway), характеризующийся экстремальной скоростью тепловыделения, высокой температурой, риском взрыва и повторного воспламенения, а также токсичностью продуктов горения. Существующие способы и средства пожаротушения, эффективные для транспортных средств (ТС) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), зачастую оказываются малоэффективными или ресурсозатратными при ликвидации пожаров EV.

Современные EV с электрической или гибридной силовой установкой классифицируются по степени электрификации и типу применяемого источника энергии. К основным категориям относятся: электромобили без ДВС (BEV, battery electric vehicle), гибридные электрические автомобили (HEV, hybrid electric vehicle), подключаемые гибридные электрические автомобили (PHEV, plug-in hybrid electric vehicle), электромобили с увеличенным запасом хода (EREV, extended range electric vehicle), водородные электромобили на топливных элементах (FCEV, fuel cell electric vehicle), а также мягкие гибридные электрические автомобили (MHEV, mild hybrid electric vehicle) и малые городские электромобили (NEV, neighborhood electric vehicle).

В рамках настоящего исследования акцент сделан на BEV, поскольку их тяговые АКБ обладают наибольшей емкостью, что при возгорании приводит к значительному тепловыделению и существенно осложняет процесс тушения.

Основная часть

1. Развитие транспорта в Республике Беларусь (2022–2024 гг.). Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь¹, за период 2022–2024 гг. количество зарегистрированных EV в стране возросло с 3635 до 26 356 единиц (рис. 1), что соответствует росту в 7,25 раза².

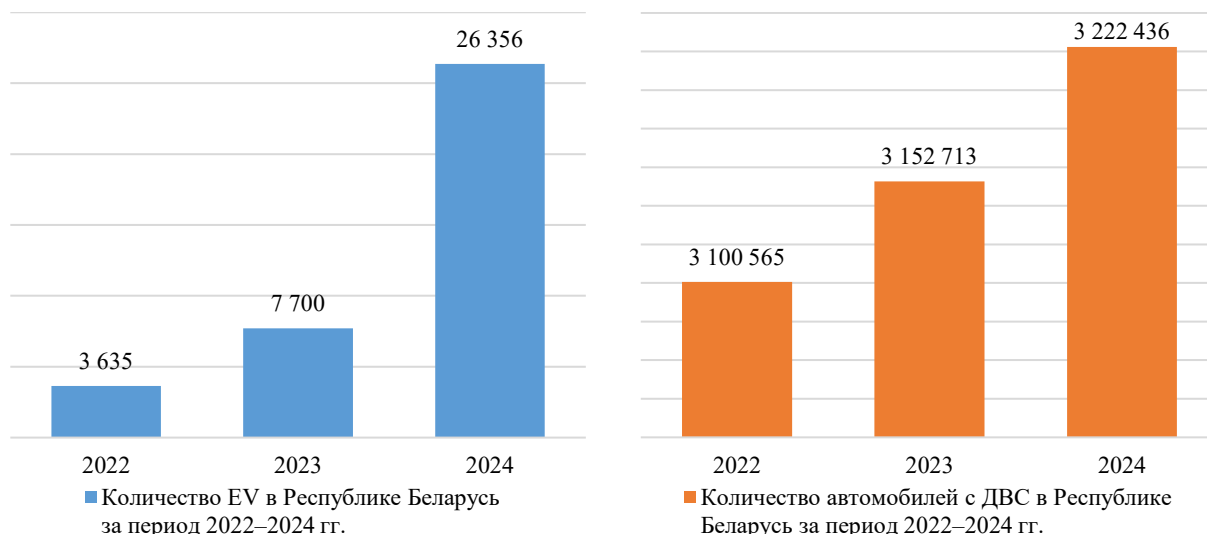


Рисунок 1. – Динамика роста парка EV и автомобилей с ДВС в Республике Беларусь (2022–2024 гг.)

Парк легковых автомобилей с ДВС увеличился в 1,04 раза (с 3,10 до 3,22 млн ед.). Отдельного внимания заслуживает развитие электротранспорта в сегменте общественного транспорта: к концу 2024 г. в стране насчитывалось порядка 147 электробусов. Экспоненциальный рост парка EV характерен не только для Беларуси, но и для других стран, где ежегодное удвоение количества EV создает системные вызовы для подразделений МЧС. К 2030 г. доля EV на рынке может достичь 300 000 единиц, что потребует масштабной модернизации инфраструктуры³.

Распределение EV по регионам Беларуси представлено на рисунке 2.

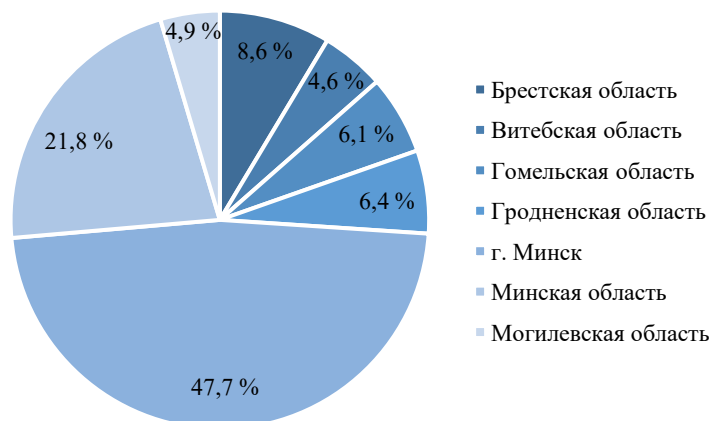


Рисунок 2. – Региональное распределение EV в Республике Беларусь (2024 г.)

¹ Наличие транспортных средств (на конец года) // Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации Национального статистического комитета Республики Беларусь: [сайт]. – Минск, 1998–2024. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10209000005> (дата обращения: 05.05.2025).

² Количество электромобилей в Беларуси за год увеличилось в 3 раза // evon.by: сайт ООО «ЮНИСТЕП». – 2025. – 18 мар. – URL: <https://evon.by/kolichestvo-elektromobilej-v-belarusi-za-god-uvelichilos-v-3-raza/> (дата обращения: 05.05.2025).

³ К 2030 году в Белоруссии будет почти в 30 раз больше электромобилей, чем сейчас // iXBT.com. – 2024. – 3 апр. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2024/04/03/k-2030-godu-v-belorussii-budet-pochti-v-30-raz-bolshe-jelektromobilej-chem-sejchas.html> (дата обращения: 05.05.2025).

Территориальное распределение EV демонстрирует высокую концентрацию в столичном регионе: г. Минск – 12 571 ед. (47,7 % от общего парка), Минская область – 5758 ед. (21,8 %). В сумме на столичный регион приходится 69,5 % всех зарегистрированных EV (рис. 2), что обусловлено наиболее развитой зарядной инфраструктурой. Распределение по другим областям: Брестская – 2271 ед. (8,6 %), Гродненская – 1699 ед. (6,4 %), Гомельская – 1614 ед. (6,1 %), Витебская – 1301 ед. (4,9 %), Могилевская – 1214 ед. (4,6 %) ⁴.

Анализ данных Национального статистического комитета Республики Беларусь и оператора зарядных станций «Маланка» ⁵ выявил следующие ключевые тенденции в сегменте электротранспорта. Лидерами рынка являются китайские бренды (около 60 % рынка): BEV BYD Song Plus, BYD Dolphin, Zeekr 001 и EREV Voyah Free, Voyah Dream. В премиум-сегменте доминируют BEV Tesla Model 3, Tesla Model, Porsche Taycan, Mercedes-Benz EQS. Постепенно теряют долю рынка из-за ограниченной автономности и высокой стоимости обслуживания, а также конкуренции с китайскими аналогами BEV Nissan Leaf, Renault Zoe, Audi e-tron и Hyundai Kona. Доля HEV достигла 28 % в 2025 г., что обусловлено их способностью комбинировать электротягу. Следует отметить, в мае 2025 г. был представлен первый белорусский EV Belgee eX50, с локализацией 70 % компонентов, что создает потенциал для импортозамещения ⁶.

2. Статистика пожаров EV в Республике Беларусь. За 2024 г. в Минске зарегистрировано 60 пожаров ТС, из них 2 случая с BEV ⁷. МЧС Беларуси не публикует отдельной статистики по возгораниям EV, однако по данным СМИ, в Республике Беларусь за период с 2021 по 2025 г. зафиксировано пять случаев возгорания BEV.

27 июля 2021 г., г. Могилев. В результате дорожно-транспортного происшествия (ДТП) с участием BEV марки Tesla Model 3 (рис. 3) произошло механическое разрушение кузова с последующим возгоранием и полным термическим уничтожением ТС. Причиной инцидента стала потеря контроля над управлением, приведшая к столкновению с опорой освещения. Водитель госпитализирован с травмами ⁸.

26 марта 2023 г., г. Жодино. Возгорание BEV марки Zotye E200 (рис. 4) на территории жилой застройки, сопровождавшееся взрывом ⁹. Официальная версия причин возгорания указывает на КЗ электрических цепей ТС. В результате возгорания транспортное средство полностью уничтожено, пострадавших нет ¹⁰.

11 марта 2024 г., аг. Колодищи. Самопроизвольное возгорание тяговой АКБ BEV марки Porsche Taycan (рис. 5) спровоцировало распространение пожара на шесть BEV марки Tesla и мотоцикл на территории станции технического обслуживания. Судебная экспертиза, проведенная Государственной комиссией судебно-экспертных исследований, установила, что причиной возгорания стало КЗ в одной из ячеек тяговой АКБ Porsche Taycan. Данный дефект привел к неконтролируемому выделению тепла, что вызвало цепную реакцию и возгорание рядом стоящих ТС. В результате возгорания восемь ТС полностью уничтожены, пострадавших нет ¹¹.

⁴ См. сноску 2.

⁵ Ахрем, А. Цены снижаются, скорость заряда растет: тенденции рынка электромобилей в мире и Беларуси // А. Ахрем // abw.by: Автопортал. – 2025. – 28 янв. – URL: <https://abw.by/news/automarket/2025/01/28/ceny-snizhautsya-skorost-zaryada-rastet-tendencii-rynka-elektromobilei-v-mire-i-belarusi> (дата обращения: 05.05.2025).

⁶ Первый белорусский электромобиль Belgee eX50: презентация в мае 2025 года // findit.city. – 2025 – 20 апр. – URL: <https://findit.city/belarus/minsk/news/pervyy-belorusskiy-elektromobil-belgee-ex50-prezentaciya-v-mae-2025-goda> (дата обращения: 05.05.2025).

⁷ В 2024 г. в Минске горели 60 автомобилей, в том числе одна «электричка» // Минское городское управление МЧС Республики Беларусь. – 2024. – 1 апр. – URL: <https://minsk.mchs.gov.by/novosti/447346/> (дата обращения: 05.05.2025).

⁸ ДТП в Могилеве: Tesla врезалась в световую опору и загорелась // ont.by: Общенациональное телевидение Беларуси. – 2021. – 26 апр. – URL: <https://ont.by/news/dtp-v-mogileve-tesla-vrezalas-v-svetovuyu-oporu-i-zagorelas> (дата обращения: 05.05.2025).

⁹ В Жодино взорвался электромобиль // smartpress.by: информационный ресурс Смартпресс. – 2024. – 3 мая. – URL: <https://smartpress.by/news/40506/> (дата обращения: 05.05.2025).

¹⁰ Взрыв электромобиля Zotye в Беларуси попал на видео // autogrodno.by. – 2024. – 15 февр. – URL: <https://autogrodno.by/news/28477-zotye-e200-vrzuv.html> (дата обращения: 05.05.2025).

¹¹ Ажгирей, М. На СТО в Колодищах сгорели семь электрокаров и мотоцикл: эксперты назвали причину пожара // М. Ажгирей // abw.by: Автопортал. – 2024. – 16 мая. – URL: <https://abw.by/news/incidents/2024/05/16/na-sto-v-kolodischah-sgoreli-sem-elektrokarov-i-motocikl-eksperty-nazvali-prichinu-pozhara> (дата обращения: 05.05.2025).

16 марта 2024 г., г. Минск. Произошло возгорание BEV марки Nissan Leaf (рис. 6). Согласно информации, предоставленной МЧС в средствах массовой информации, спасателям потребовалось около часа, чтобы потушить BEV (задействовали аварийно-спасательный инструмент). В результате пожара поврежден салон, моторный отсек и электроника EV¹².

17 января 2025 г., д. Междуречье. Произошло возгорание неизвестного BEV, в результате которого он был полностью уничтожен (рис. 7). Пострадавших в результате инцидента не зафиксировано¹³.



Рисунок 3. – ДТП BEV марки Tesla Model 3 (27 июля 2021 г., г. Могилев)



Рисунок 4. – Возгорание BEV марки Zotye E200 (26 марта 2023 г., г. Жодино)



Рисунок 5. – Возгорание BEV марки Porsche Taycan (11 марта 2024 г., аг. Колодищи)



Рисунок 6. – Возгорание BEV марки Nissan Leaf (16 марта 2024 г., г. Минск)



Рисунок 7. – Возгорание неизвестного BEV (17 января 2025 г., д. Междуречье)

Согласно данным международных исследований¹⁴, количество пожаров BEV составляет 20–30 случаев на 100 000 ТС. Для HEV этот показатель выше: 50 пожаров на 100 000 единиц в США и до 40 – в Европе. Для сравнения: у автомобилей с ДВС фиксируется в среднем 3500 возгораний на 100 000 единиц. Анализ статистики пожаров демонстрирует, что

¹² Бурый, В. Видео: на столичной улице горел электромобиль / В. Бурый // auto.onliner.by. – 2024. – 18 мар. – URL: <https://auto.onliner.by/2024/03/18/gorel-elektromobil> (дата обращения: 05.05.2025).

¹³ Савко, Л.В. Междуречье сгорел электромобиль / Л. Савко // sammit.tv. – 2025. – 17 янв. – URL: <https://sammit.tv/2025-01-17/v-mezhdureche-sgorel-jelektromobil/> (дата обращения: 05.05.2025).

¹⁴ Вероятность возгорания электромобиля в 60 раз ниже, чем машины с ДВС // columbauto.by. – URL: <https://columbauto.by/news/veroyatnost-vozhgoraniya-elektromobilya-v-60-raz-nizhe-chem-mashiny-s-dvs/> (дата обращения: 05.05.2025).

количество пожаров у BEV примерно в 60 раз ниже, чем у HEV, и в 140 раз ниже, чем у автомобилей с ДВС. Однако этот фактор должен рассматриваться в контексте ключевых вызовов: экспоненциально растущий парк EV в мире неизбежно приведет к увеличению абсолютного числа инцидентов, а также возгорания BEV требуют принципиально иных, значительно более сложных и дорогостоящих способов тушения по сравнению с автомобилями с ДВС.

3. Особенности развития пожара тяговой АКБ. Характерной особенностью возгораний EV является стремительное развитие термических процессов (thermal runaway) в тяговой АКБ. Этот процесс характеризуется экстремальным тепловыделением (температура в батарейном модуле достигает 800–1000 °C за 2–15 с), а также высокой вероятностью воспламенения (через несколько часов или даже суток после тушения), что обусловлено остаточной энергией в поврежденных участках аккумуляторных элементов [2; 3].

Основные факторы, инициирующие термический разгон:

1. Механические повреждения. Прокол, удар, сдавливание или деформация корпуса элемента вызывают непосредственное КЗ между электродами или повреждают внутренние компоненты.

2. Электрический перезаряд. Превышение верхнего порогового напряжения зарядки вызывает необратимые реакции (окисление электролита, структурные изменения катода) с интенсивным тепловыделением.

3. Экстремальные режимы заряда/разряда. Высокоскоростная зарядка большими токами, особенно при низких температурах, способствует образованию дендритов на аноде (рост литиевых дендритов), что повышает риск пробоя сепаратора и внутреннего КЗ. Глубокий разряд также опасен.

4. Тепловое воздействие. Эксплуатация или хранение при повышенных температурах ускоряет деградиционные процессы компонентов тяговой АКБ. Низкие температуры увеличивают внутреннее сопротивление и риск литиевого покрытия при заряде.

5. Производственные дефекты. Нарушения технологии изготовления снижают устойчивость тяговой АКБ к эксплуатационным нагрузкам.

4. Особенности тушения тяговой АКБ. Анализ отечественного и международного опыта тушения [4–10] выявил следующие системные проблемы при ликвидации возгораний EV:

– Сложность тушения и охлаждения тяговой АКБ. Герметичный защитный корпус тяговой АКБ препятствует проникновению огнетушащих веществ (ОВ) напрямую в очаг пожара. Для эффективного подавления реакции и охлаждения элементов требуется около 10 000 л воды (или специальных составов), подаваемых непрерывно в течение 60–90 мин. Также термический разгон способен лавинообразно распространяться на соседние аккумуляторные элементы, делая современные способы тушения недостаточно эффективными.

– Риск повторного возгорания после тушения, а также высокая вероятность взрыва из-за накоплений горючих газов внутри тяговой АКБ.

– Напряжение в высоковольтной системе BEV (400–800 В) сохраняет угрозу поражения электрическим током даже после деактивации тяговой АКБ.

– Токсичность продуктов горения. Горение тяговой АКБ сопровождается выделением веществ, представляющих опасность для здоровья человека, включая фтороводород, оксиды кобальта, никеля, марганца, а также органические растворители, образующие токсичные пары.

5. Способы тушения (охлаждения) тяговой АКБ

Охлаждение водой. Способ тушения основан на непрерывной подаче ОВ в нижнюю часть аккумуляторного отсека для охлаждения тяговой АКБ, предотвращения распространения пожара между аккумуляторными ячейками и предотвращения термического разгона. Основным преимуществом данного способа является его доступность, т.к. для реализации не требуется специализированного оборудования. Отрицательной стороной является чрезмерный расход воды, образование токсичных стоков, содержащих ионы лития, кобальта и фторсодержащие соединения. Кроме того, эффективность данного метода ограничена конструктивными особенностями EV: защитный корпус тяговой АКБ препятствует подаче ОВ непосредственно в зону экзотермической реакции, в результате чего большая часть ОВ не участвует в охлаждении. Для повышения эффективности требуется применение специальных добавок и систем рециркуляции жидкости [5].

Охлаждение тяговой АКБ через люк экстренного доступа. Данный способ основан на использовании термоплавких элементов, которые при достижении критической температуры (около 180 °С) разрушаются, формируя технологические отверстия для доступа ОВ к элементам тяговой АКБ. Ключевым преимуществом является автоматическое размыкание высоковольтной цепи при активации системы, что минимизирует риск поражения спасателей-пожарных электрическим током. Однако данный способ обладает существенными ограничениями: его эффективность зависит от конструктивных особенностей конкретной модели EV, что снижает универсальность способа, а деформация кузова при ДТП блокирует доступ к люку, делая его неэффективным при серьезных авариях. Следует также отметить, что при горении тяговой АКБ существует сложность подачи ОВ, из-за большого теплового потока и внедрение таких решений требует сотрудничества с производителями и специальной подготовки спасателей-пожарных.

Охлаждение тяговой АКБ погружением в высоковольтные контейнеры. Способ заключается в изоляции горящего EV в герметичную емкость объемом 20–30 м³, оснащенную кислотостойкими уплотнителями и системой заполнения жидкостью. Преимущества включают нейтрализацию токсичных веществ и универсальность применения, независимо от модели ТС. Однако высокая стоимость оборудования (до 50 000 \$ за единицу) и отсутствие четких алгоритмов по утилизации загрязненных контейнеров ограничивают их массовое использование. Дополнительной проблемой является необходимость лебедочного механизма для перемещения EV. Следует отметить, что данный способ неэффективен при пожаре EV в труднодоступных местах (подземные и многоуровневые паркинги, а также тоннели) [6].

Охлаждение тяговой АКБ способом пробоя. Указанный способ основан на локальной подаче ОВ через перфорированные насадки специальных стволов-пробойников (5–8 отверстий диаметром 2–3 мм), пробивающих корпус тяговой АКБ. Технология позволяет сократить расход воды на 85–90 % по сравнению с традиционным охлаждением. Основные ограничения связаны с необходимостью точного знания конструктивных особенностей и расположения тяговой АКБ. Неправильное позиционирование ствола снижает эффективность охлаждения, более того, сильная деформация при ДТП, может сделать этот способ недоступным, а из-за большого теплового потока существует сложность подачи ОВ в тяговую АКБ.

Подавление пламени огнезащитными полотнами. Способ предполагает изоляцию очага возгорания с помощью полотен из силиконизированного стекловолокна с алюминизированным покрытием, выдерживающих температуру до 600 °С. Вместе с тем при термическом разгоне батарей материал теряет эффективность из-за разрушения защитного слоя. Применение противопожарных полотен целесообразно в сочетании с другими способами тушения или в качестве начального этапа локализации возгораний EV, особенно в условиях ограниченного доступа или необходимости экстренной эвакуации не горящих ТС из труднодоступных зон.

Заключение

Проведенный комплексный анализ пожаров с участием BEV на территории Республики Беларусь за период 2021–2025 гг. позволил сделать следующие основные выводы:

1. Парк EV в Республике Беларусь характеризуется экспоненциальным ростом (с 3635 единиц в 2022 г. до 26 356 единиц в 2024 г.), при этом его распределение крайне неравномерно: около 69,5 % сконцентрировано в Минске и Минской области.

2. Анализ имеющихся данных подтверждает, что относительная частота пожаров у BEV в настоящее время примерно в 60 раз ниже, чем у HEV, и в 140 раз ниже, чем у автомобилей с ДВС. Однако тушение возгораний EV сопряжено с принципиально иными, значительно более сложными и дорогостоящими способами тушения по сравнению с автомобилями на ДВС.

3. Характерной особенностью возгораний EV является термический разгон, инициируемый преимущественно механическими повреждениями, электрическим перезарядом, экстремальными режимами заряда/разряда, тепловым воздействием, а также производственными дефектами.

4. Ликвидация пожаров EV связана со значительными трудностями: сложность тушения и охлаждения тяговой АКБ, высокий риск повторных возгораний и взрывов, опасность поражения электрическим током, а также высокая токсичность продуктов горения.

5. Сравнительный анализ способов тушения установил, что ни один из существующих способов не является эффективным на 100 %. Охлаждение водой требует большого количества ОВ и не обеспечивает прямого доступа в тяговую АКБ. Способ пробоя и экстренного доступа теряет эффективность при деформации кузова, а также из-за большого теплового потока существует сложность подачи ОВ. Погружение в высоковольтные контейнеры невозможно в стесненных условиях. Подавление пламени огнезащитными полотнами эффективно исключительно на начальной стадии пожара, когда требуется подготовка средств тушения и экстренная эвакуация негорящих ТС из труднодоступных зон. На сегодня оптимальным решением является комбинация существующих способов тушения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией ресурсозатрат при тушении, изучением альтернативных ОВ и технологий, а также разработкой и совершенствованием способов тушения при горении тяговых АКБ. Обеспечение пожарной безопасности в условиях массового перехода на электротранспорт требует системного подхода, объединяющего технические решения, организационные меры, нормативно-правовое регулирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. О Комплексной программе развития электротранспорта на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 9 апр. 2021 г. № 213 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100213> (дата обращения: 05.05.2025).
2. Коробочка, Д.Н. Механизмы, факторы и последствия термического разгона литий-ионных аккумуляторных батарей / Д.Н. Коробочка, А.В. Пивоваров, В.В. Лахвич // Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. материалов XI Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Минск, 30 мая 2025 г. / УГЗ. – Минск: УГЗ, 2025. – С. 115.
3. Feng, X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu [et al.] // Energy Storage Materials. – 2018. – Vol. 10. – P. 246–267. – DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
4. Канонин, Ю.Н. Пожарная опасность электромобилей / Ю.Н. Канонин, А.В. Лыщик // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 38–51. – DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51. – EDN: ZJAQX.
5. Аубакиров, С.Г. Как и чем тушить электромобили? Сравнительный анализ способов тушения пожаров электромобилей / С.Г. Аубакиров, Р.М. Джумагалиев // cesdrr.org: сайт Центра по чрезвычайным ситуациям и снижению риска стихийных бедствий, Республика Казахстан, г. Алматы. – 11 с. – URL: https://cesdrr.org/uploads/docs/2024/sravnitelnyi_analiz_sposobov_tusheniya.pdf (дата обращения: 05.05.2025).
6. Foessleitner, P. Challenges of alternative fuel vehicles and their impact on safety in road tunnels: diss. ... for the degree of PhD in technical sciences / P. Foessleitner; Graz University of Technology. – Graz, 2024. – 197 p. – DOI: 10.3217/mk26s-s1544.
7. Галкина, А.А. Анализ динамики развития горения при расследовании пожаров электромобилей / А.А. Галкина, А.Л. Беляк, А.А. Шеков // Право и управление. – 2024. – № 12. – С. 307–313. – EDN: QJCEEI.
8. Кобяк, В.В. Разработка многофункционального тренажерного комплекса для ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий на электротранспорте / В.В. Кобяк, В.Е. Бабич, В.В. Кессо [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 1. – С. 75–85. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.75. – EDN: KСATEM.
9. Николаев, В.А. Возможные способы пожаротушения электромобилей в современном мире / В.А. Николаев, Е.С. Бажанова // Вестник науки. – 2025. – Т. 2, № 2 (83). – С. 763–769. – EDN: NATUVP.
10. Методические рекомендации МЧС по тушению пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций в электромобилях и электробусах: утв. первым заместителем министра А.Ф. Худолеевым 6 окт. 2021 г. – Минск: МЧС Респ. Беларусь, 2021. – 28 с.

**Пожары с участием электромобилей в Республике Беларусь:
статистический анализ, особенности развития и тушения**

**Fires involving electric vehicles in the Republic of Belarus:
statistical analysis, development features and extinguishing methods**

Пивоваров Александр Вадимович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра ликвидации
чрезвычайных ситуаций, преподаватель

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

Email: sasha1500vo@list.ru

SPIN-код: 5506-5244

Aleksandr V. Pivovarov

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

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

Email: sasha1500vo@list.ru

ORCID: 0009-0006-5876-9949

Лахвич Вячеслав Вячеславович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации чрезвычайных
ситуаций, начальник факультета

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

Email: slavaspec@rambler.ru

SPIN-код: 5450-0192

Vyacheslav V. Lakhvich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Emergency Prevention and Elimination,
Head of the Faculty

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

Email: slavaspec@rambler.ru

ORCID: 0000-0001-7601-305X

Кобяк Валерий Викторович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра ликвидации
чрезвычайных ситуаций, профессор

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

Email: valkobkii@gmail.com

SPIN-код: 7828-1103

Valeriy V. Kobyak

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

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

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

Email: valkobkii@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5989-5465

Казутин Евгений Геннадьевич

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники, профессор

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

Email: EKazutin@tut.by

Evgeniy G. Kazutin

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Rescue Equipment,
Professor

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

Email: EKazutin@tut.by

ORCID: 0009-0008-1498-6284

FIRES INVOLVING ELECTRIC VEHICLES IN THE REPUBLIC OF BELARUS: STATISTICAL ANALYSIS, DEVELOPMENT FEATURES AND EXTINGUISHING METHODS

Pivovarov A.V., Lakhvich V.V., Kobyak V.V., Kazutin E.G.

Purpose. To conduct a comprehensive analysis of fires involving battery electric vehicles (BEV) in the Republic of Belarus during the period 2021–2025, as well as to assess their development features and firefighting methods.

Methods. Statistical analysis of data on the electric vehicle (EV) fleet for the period 2022–2024 and on fires involving BEVs for 2021–2025, including preliminary data for 2025; comparative analysis of the effectiveness of existing methods for extinguishing high-voltage lithium-ion traction battery packs (traction batteries).

Findings. An exponential growth of the EV fleet in the Republic of Belarus was identified for the period 2022–2024. The dominant causes of fires were determined, the key one being thermal runaway in lithium-ion traction batteries, mainly triggered by short circuits resulting from mechanical damage or manufacturing defects. The low efficiency of extinguishing (cooling) traction batteries with conventional fire hoses was established. The necessity of applying specialized tactics and technical means for extinguishing traction batteries was revealed, such as piercing nozzles, high-voltage containers, fire blankets, and others.

Application field of research. The results of the study are intended for the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, EV manufacturers, insurance companies, as well as for the development of regulatory legal acts in the field of EV fire safety.

Keywords: BEV fires, thermal runaway, electric vehicle extinguishing, lithium-ion batteries, high-voltage systems, firefighting methods, electric vehicle fire safety.

(The date of submitting: June 6, 2025)

REFERENCES

1. *O Kompleksnoy programme razvitiya elektrotransporta na 2021–2025 gody* [On the Comprehensive Program of the Development of Electric Transport for 2021–2025]: *Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated April 9, 2021 No. 213*. National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100213> (accessed: May 5, 2025). (rus)
2. Korobochka D.N., Pivovarov A.V., Lakhvich V.V. Mekhanizmy, faktory i posledstviya termicheskogo razgona lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey [Mechanisms, factors and consequences of thermal runaway in lithium-ion batteries]. *Proc. of XI Intern. correspondence scientific-practical conf. «Tekhnologii likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy»*, Minsk, May 30, 2025. Minsk: UCP, 2025. Pp. 115. (rus)
3. Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 2018. Vol. 10. Pp. 246–267. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
4. Kanonin Yu.N., Lyshchik A.V. Fire danger of electric vehicles. *Bulletin of Scientific Research Result*, 2023. No. 1. Pp. 38–51. (rus). DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51. EDN: ZJAQX
5. Aubakirov S.G., Dzhumagaliev R.M. *Kak i chem tushit' elektromobili? Sravnitel'nyy analiz sposobov tusheniya pozharov elektromobiley* [How and what to extinguish electric vehicles with? Comparative analysis of methods for extinguishing fires on electric vehicles]. Cesdr.org: website of the Center for Emergency Situations and Disaster Risk Reduction, Republic of Kazakhstan, Almaty. 11 p. Available at: https://cesdr.org/uploads/docs/2024/sravnitelnyi_analiz_sposobov_tusheniya.pdf (accessed: May 5, 2025). (rus)
6. Foessleitner P. *Challenges of alternative fuel vehicles and their impact on safety in road tunnels*. PhD tech. sci. diss.; Graz University of Technology. Graz, 2024. 197 p. DOI: 10.3217/mk26s-s1544.
7. Galkina A.A., Belyak A.L., Shekov A.A. Analiz dinamiki razvitiya goreniya pri rassledovanii pozharov elektromobiley [Analysis of the dynamics of combustion development during the investigation of fires in electric vehicles]. *Law and Management*, 2024. No. 12. Pp. 307–313. EDN: QJCEEI.
8. Kobyak V.V., Babich V.E., Kesso V.V., Sak S.P., Skorupich I.S. Razrabotka mnogofunktsional'nogo trenazhernogo kompleksa dlya likvidatsii posledstviy dorozhno-transportnykh proisshestviy na elektrotransporte [Development of a multifunctional training complex for the elimination of consequences of

- road accidents in electric transport], *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 1. Pp. 75–85. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.75. EDN: KCATEM.
9. Nikolaev V.A., Bazhanova E.S. Vozmozhnye sposoby pozharotusheniya elektromobiley v sovremen-
nom mire [Possible ways fire extinguishing of electric vehicles in the modern world]. *Vestnik nauki*,
2025. Vol. 2, No. 2 (83). Pp. 763–769. EDN: HATUVP.
 10. Metodicheskie rekomendatsii MChS po tusheniyu pozharov i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy
v elektromobilyakh i elektrobusakh [Methodological recommendations of the Ministry for Emergency
Situations on extinguishing fires and eliminating emergencies on electric vehicles and electric buses]:
approved by the First Deputy Minister A. F. Khudoleyev on October 6, 2021. Minsk: MES of the
Republic of Belarus, 2021. 28 p.

Copyright © 2025 Pivovarov A.V., Lakhvich V.V., Kobyak V.V., Kazutin E.G.

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

ПОВЫШЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОГNETУШАЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАТОРА АЭРОЗОЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Максимов П.В.

Цель. Повышение пожарной безопасности при работе генератора огнетушащего аэрозоля (ГОА), заключающееся в снижении температур выходного потока огнетушащего аэрозоля (ОА) до значений, при которых исключается самовоспламенение и плавление веществ и материалов в защищаемом помещении, достигаемым конструктивным способом газодинамического охлаждения.

Методы. Анализ литературы; сравнение существующих результатов экспериментальных и теоретических исследований по снижению выходной температуры потока пожаротушащей смеси генераторов аэрозоля; сопоставление экспериментального образца и серийно выпускаемого генератора при лабораторном исследовании полей температуры аэрозольного потока и корпусов генераторов и при огневых испытаниях.

Результаты. Разработан новый конструктивный способ газодинамического охлаждения огнетушащего аэрозоля на выходе из ГОА, заключающийся в модификации его конструкции профилирующей вставкой, выполненной по типу кольцевого сопла Лавала с цилиндрическим центральным телом, и обеспечивающий эффективное тушение модельных очагов пожаров. На базе серийно выпускаемого генератора изготовлен модифицированный указанным конструктивным газодинамическим охладителем экспериментальный образец ГОА, огневые испытания которого подтвердили снижение температуры потока ОА при выходе из генератора на 70–75 % в сравнении с серийно выпускаемым генератором. Время ликвидации пламенного горения в защищаемом помещении при огневых испытаниях уменьшилось в 2 раза.

Область применения исследований. ГОА, модифицированный газодинамическим охладителем в виде профилирующей вставки, выполненной по типу кольцевого сопла Лавала с цилиндрическим центральным телом, может эффективно использоваться в качестве оперативного средства пожаротушения нетлеющих веществ и материалов.

Ключевые слова: генератор огнетушащего аэрозоля, твердотопливный элемент, огнетушащий аэрозоль, кольцевое сопло Лавала, газодинамический охладитель, полигонные огневые испытания.

(Поступила в редакцию 3 октября 2025 г.)

Введение

В ходе накопления практического опыта ликвидации пожаров происходило развитие средств тушения от их примитивных типов до современных роботизированных комплексов для работы в сложных условиях. Разработаны различные способы тушения, которые основывались на принципах охлаждения, изоляции горючих материалов от воздействия высоких температур. Из известных способов объемного тушения пожаров в закрытых помещениях наиболее эффективным и перспективным в своем развитии считается аэрозольный [1].

В настоящее время для локализации и ликвидации пожаров в помещениях [2] активно используют ГОА на основе твердотопливных аэрозолеобразующих огнетушащих составов (АОС). Результаты испытаний научно-исследовательских лабораторий подтверждают надежность работы ГОА в сочетании с эффективностью пожаротушения [3]. Однако основным недостатком аэрозольных средств пожаротушения является применение в них АОС, характеризующихся высокой температурой сгорания (более 700 °С) [4; 5]. Такая температура представляет повышенную опасность их применения из-за возможности воспламенения горючих веществ в помещении с низкой температурой самовоспламенения.

Согласно литературным и патентным данным безопасность и эффективность аэрозольного пожаротушения может быть достигнута регулированием рецептурного состава ОА с температурой газовой фазы ниже минимальной температуры самовоспламенения веществ и материалов и/или применением различных конструктивных приемов [6–11]. Из анализа рецептурного подхода снижения температуры ОА при работе генераторов установлено, что интервалы температур потока аэрозоля на выходе из генератора остаются высокими, т.к.

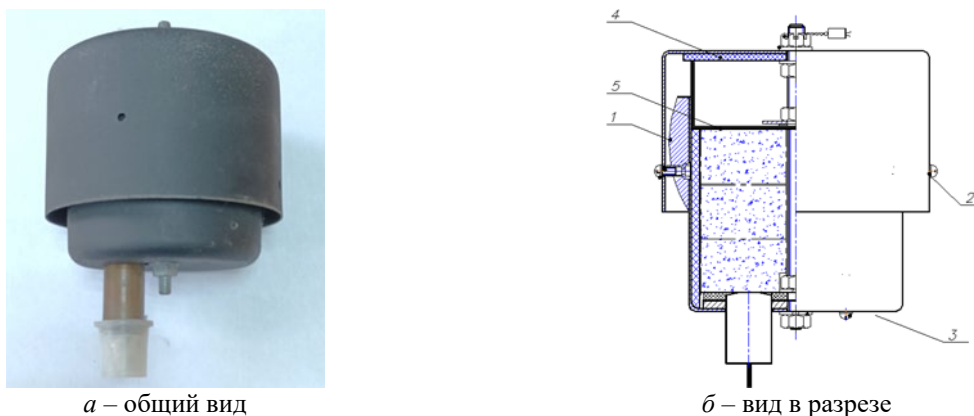
каждый химический реагент имеет конечные термические свойства. При использовании различных конструктивных подходов для снижения выходной температуры потока аэрозоля достигнуты интервалы температур (80–175 °С) [12], (50–150 °С) [13], в которых, несмотря на значительное снижение начальных температур, максимальные значения температуры в достигнутых диапазонах остаются небезопасными.

Для снижения температуры потока ОА в установках аэрозольного пожаротушения представляло интерес применить известный принцип сопла Лавалья, который используется в современных ракетных, сверхзвуковых, реактивных авиационных двигателях, а также в настоящее время применяется для подачи ОА на высоту и тушения объемным способом факела потока нефти или газа [14].

Основная часть

Целью работы являлась конструктивная модификация ГОА с помощью встроенного устройства типа сопла Лавалья, улучшающая газодинамическое охлаждение выходного потока пожаротушающей смеси, и экспериментальная проверка эффективности данной модификации.

По результатам теоретических расчетов ранее проведенных исследований [15] на базе ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» изготовлен экспериментальный образец ГОА «Муха-4» (рис. 1), конструкция которого модифицирована газодинамическим охладителем в виде профилирующей вставки, выполненной по типу кольцевого сопла Лавалья с цилиндрическим центральным телом (далее – ГДО-КСЛ).



а – общий вид

б – вид в разрезе

1 – профилирующая вставка; 2 – стакан верхний; 3 – стакан нижний;

4 – асбестоцементная прокладка; 5 – фракционный фильтр

Рисунок 1. – Составные части экспериментального образца ГОА «Муха-4», модифицированного ГДО-КСЛ

Для подтверждения теоретических подходов, методики расчета и конструкторской документации проведены сравнительные экспериментальные исследования ГОА с ГДО-КСЛ. Для исследования полей температуры выходного потока ОА измерения производились двумя способами: термопарами и с использованием тепловизора FLIR Systems. Сопоставительные исследования экспериментального образца ГОА с ГДО-КСЛ и серийного образца ГОА «Муха-4» без охладителя проводились с использованием разработанного нами испытательного стенда.

Принципиальная схема и общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 2. Стенд состоит из корпуса камеры 1, штатива 8, на штативе установлен исследуемый образец ГОА 2, а также закреплены термопары ТХА (К)-1199/51 4 с интервалом 0,1 м от среза выходного отверстия генератора. Термопары передают информацию на контрольно-измерительный прибор ИР «Сосна-003» 5. Для исследования температурного поля потока ОА и корпуса конструкции образца ГОА перед штативом 8 установлен тепловизор FLIRThermaCamE300 6. Для определения скорости выходного потока ОА использована трубка Пито 7. Вентиляция камеры при выходе ОА из генератора осуществлялась вертикальной вытяжкой 3.

В результате проведенных сравнительных лабораторных испытаний по исследованию выходной температуры потока аэрозоля установлено, что использование ГДО-КСЛ обеспечивает снижение температуры ОА в сравнении с серийно выпускаемым образцом

ГОВА: на срезе сопла выходного отверстия генератора – с 502 до 122 °С; на расстоянии 0,1 м от среза выходного отверстия генератора – с 187 до 56 °С.



1 – корпус камеры; 2 – экспериментальный образец ГОВА; 3 – вентиляция; 4 – термопары; 5 – контрольно-измерительный прибор; 6 – тепловизор; 7 – трубка Пито; 8 – штатив
Рисунок 2. – Испытательный стенд для исследования образцов ГОВА

Далее проведены огневые сопоставительные испытания ГОВА с ГДО-КСЛ и серийного образца ГОВА «Муха-4» для подтверждения эффективности пожаротушения модельных очагов.

Полигонные огневые испытания опытной партии генераторов огнетушащего аэрозоля с газодинамическим охладителем пожаротушащей смеси. Огневые испытания по определению огнетушащей способности ГОВА с ГДО-КСЛ, проводились по методике [16; 17] в условно-герметичной испытательной негорючей огневой камере (сооружение, изделие, огневая камера объемом 1 м³), с отношением длины к высоте и отношением длины к ширине 1:1. Объем камеры равен значению максимального объема защищаемого помещения для одного испытываемого генератора (рис. 3). Испытания проводились для модельного очага класса А (ранг очага в соответствии с методикой).



Рисунок 3. – Испытательная огневая камера

Перед началом испытаний визуальным осмотром определяли отсутствие на поверхности ГОВА следов коррозии, забоин, вмятин, трещин и других механических повреждений, дефектов. Крепление отдельных деталей, сборочных единиц исключало самопроизвольное ослабление и отвинчивание. Определение габаритных размеров проводилось с помощью линейки и штангенциркуля путем измерения расстояний между крайними точками экспериментального образца по высоте и диаметру. Массу испытываемого образца определяли с помощью весов.

Модельный очаг пожара представлял собой деревянный штабель в виде куба из брусков. Штабель размещался на твердой опоре, которая определялась в соответствии с размерами модельного очага. В качестве горючего материала использовали бруски хвойных пород дерева (сосна) первого сорта размерами 200×40±1 мм (табл. 1). Штабель выкладывался таким образом, чтобы бруски каждого последующего слоя были перпендикулярны брусьям нижележащего слоя с образованием каналов прямоугольного сечения.

Металлический поддон, предназначенный для горючей жидкости (табл. 2), помещался под деревянный штабель (рис. 3). В поддоне заливался слой воды, компенсирующий неровности дна поддона, с образованием гладкого зеркала.

Таблица 1. – Параметры модельного очага пожара класса А

Обозначение модельного очага пожара	Количество деревянных брусков в штабеле, шт.	Длина бруска, мм	Число брусков в слое, шт.	Число слоев	Площадь свободной поверхности модельного очага, м ²
0,1А	18	200	3	6	0,48

Таблица 2. – Параметры поддона для разжигания модельного очага пожара класса А

Обозначение модельного очага пожара	Размеры поддона L×B×H, мм	Минимальный объем воды, дм ³	Количество бензина, дм ³
0,1А	500×500×30	0,3	0,1

Внутри огневой камеры размещался один ГОА с ГДО-КСЛ из опытной партии, с расчетной массой АОС для этого образца. Время тушения фиксировалось через смотровое окно от момента подачи сигнала на пуск ГОА и начала истечения струи аэрозоля из генератора в огневую камеру до прекращения видимого горения модельных очагов пожара.

Модельный очаг поджигали в нижней части и давали выдержку 60 с, обеспечивая доступ воздуха в огневую камеру. По истечении времени свободного горения модельных очагов испытательное помещение закрывали и подавали сигнал на пуск экспериментального образца ГОА (рис. 4).



а – модельный очаг в виде деревянного штабеля



б – поджог горючего материала

Рисунок 4. – Проведение полигонных испытаний экспериментального образца ГОА по тушению модельного очага

В результате проведенных испытаний установлено, что пламенное горение модельных очагов прекращалось на 3-й секунде после подачи сигнала на пуск экспериментального образца генератора и поступления ОА в огневую камеру. В результате положительных огневых полигонных испытаний опытной партии ГОА с ГДО-КСЛ все модельные очаги пожара потушены, время их тушения не превысило 60 с, а также по истечении 10 мин после окончания работы ГОА и открытия проемов испытательного помещения отсутствовало пламенное горение в модельном очаге пожара (рис. 5).

В итоге огневых полигонных испытаний модельные очаги пожара были потушены. Отказов в работе всех экспериментальных образцов ГОА с ГДО-КСЛ не выявлено. Достоверность полученных результатов подтверждается применением поверенного сертификационного оборудования.



Рисунок 5. – Итог полигонных испытаний экспериментального образца ГОА по тушению модельного очага

Сопоставительные результаты испытаний экспериментальных образцов опытной партии в сравнении с серийно выпускаемой моделью генератора представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты сопоставительных полигонных испытаний

№ п/п	Наименование параметра	Генератор огнетушащего аэрозоля «Муха-4»		Экспериментальный образец ГОА с ГДО-КСЛ	
		Величина параметра	По технической документации	Величина параметра	По технической документации
1	Огнетушащая способность при тушении различных материалов, кг/м ³ : ЛВЖ (бензин АИ-92) изделия из древесины	0,08 0,085	не более 0,7	0,08 0,085	не более 0,7
2	Время подачи огнетушащего аэрозоля, не более, с	40	200	40	200
3	Масса снаряженного ГОА, кг	0,9	–	1,15	–
4	Инерционность (время срабатывания), не более, с	5	5	5	5
5	Максимальная температура корпуса во время и по окончании работы ГОА, не более, °С	530	–	300	–
6	Время ликвидации пламенного горения в защищаемом помещении, с	6	–	3	–
7	Температура на границе температурной зоны, °С: на срезе выходного отверстия от среза 100 мм от среза 250 мм от среза 300 мм от среза 400 мм	502 187 91 72 55	–	122 56 27 23 20	–

В ходе сравнительного анализа измерений и показаний установлено, что в условиях модельного пожара при работе ГОА с ГДО-КСЛ существенно снижается выходная температура до стабильных значений в диапазоне 52–56 °С, на расстоянии 0,1 м от среза выходного отверстия ГОА, также снижается температура корпуса почти в 2 раза при одинаковых основных параметрах генераторов. Зафиксировано снижение почти в 2 раза времени ликвидации пламенного горения в испытательном помещении при одинаковой огнетушащей способности. Проверку огнетушащей способности аэрозоля, получаемого при работе ГОА, осуществляли для изделий из древесины, рекомендованных для тушения и указанных в технической документации на ГОА. Экспериментально подтверждена эффективность тушения модельного очага пожара генератором аэрозоля с газодинамическим охладителем ОА, выполненным по типу устройства сопла Лавалья с цилиндрическим центральным телом.

Заключение

Разработан эффективный конструктивный способ газодинамического охлаждения огнетушащего аэрозоля на выходе из генератора огнетушащего аэрозоля (ГОА), заключающийся в модификации его конструкции газодинамическим охладителем в виде профилирующей вставки, выполненной по типу кольцевого сопла Лавалья с цилиндрическим центральным телом (ГДО-КСЛ) [18]. Изготовлен опытный образец ГОА с ГДО-КСЛ, обеспечивающий эффективное охлаждение генерируемого аэрозоля. Экспериментально подтверждено, что ГДО-КСЛ обеспечивает снижение температуры огнетушащего аэрозоля в сравнении с серийно выпускаемым образцом ГОА: на срезе сопла выходного отверстия генератора – с 502 до 122 °С; на расстоянии 0,1 м от среза выходного отверстия генератора – с 187 °С до температуры в интервале 52–56 °С. Проведены натурные огневые испытания опытной партии ГОА с ГДО-КСЛ, в результате которых доказана его эффективность тушения модельных очагов пожара: время ликвидации пламенного горения в защищаемом помещении уменьшилось в 2 раза в сравнении с серийно выпускаемым образцом генератора. ГОА с ГДО-КСЛ готов к использованию в качестве эффективного оперативного средства пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов, В.В. Обоснование способов аэрозольного пожаротушения в высотных помещениях и сооружениях / В.В. Агафонов, Д.В. Бухтояров, В.А. Гришакина [и др.] // Пожарная безопасность. – 2019. – № 4 (97). – С. 21–31. – EDN: PYOHND.
2. Копылов, С.Н. Эволюция средств объемного пожаротушения: от озоноразрушающих агентов до огнетушащих веществ с коротким временем жизни в атмосфере / С.Н. Копылов, В.В. Агафонов, Н.П. Копылов // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 123–130. – EDN: PIJAOD.
3. Гацоев, К.Г. Проблемы аэрозольного пожаротушения / К.Г. Гацоев // Пожаровзрывобезопасность. – 1999. – Т. 8, № 4. – С. 59–61.
4. Самборук, А.Р. Газогенерация и аэрозолеобразование в средствах пожаротушения / А.Р. Самборук // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2006. – № 40. – С. 128–135. – EDN: IWZIJL.
5. Агафонов, В.В. Установки аэрозольного пожаротушения. Элементы, характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация / В.В. Агафонов, Н.П. Копылов. – М.: ВНИИПО, 1999. – 236 с.
6. Жарков, А.С. Низкотемпературные газогенерирующие устройства в средствах пожаротушения и аварийного спасения / А.С. Жарков, Ю.Е. Орионов, В.Н. Осипков // Пожарная безопасность. – 2001. – № 1. – С. 181–184.
7. Бортников, Р.А. Постановка задачи оптимизации работы теплообменника в аэрозольной системе пожаротушения / Р.А. Бортников, Б.Ф. Потапов, С.Ю. Серебренников // Вестник Пермского государственного технического университета. – 2004. – № 20. – С. 8–18.
8. Кузнец, Е.А. Аэрозолеобразующие огнетушащие составы, генерирующие хлориды щелочных металлов / Е.А. Кузнец, А.П. Амосов, А.А. Самборук // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 32. – С. 210–211. – EDN: JWUXUP.
9. Алтухов, О.И. Устройство аэрозольно-порошкового пожаротушения / О.И. Алтухов, А.П. Амосов, Е.А. Кузнец [и др.] // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – № 2 (27). – С. 92–100. – EDN: NCTCVH.
10. Расенко, А.А. Разработка низкотемпературного аэрозолеобразующего состава на основе активных углей / А.А. Расенко, А.М. Седогин, К.С. Анохин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 6 (74). – С. 104–106. – EDN: QZMIZN.
11. Корольченко, Д.А. Новое поколение газоаэрозольных генераторов / Д.А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – Т. 7, № 2. – С. 71–74.
12. Коломин, А.Е. Влияние основных параметров на процесс теплообмена в порошкообразном емкостном охладителе / А.Е. Коломин, В.И. Калинин, С.Ю. Серебренников // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2004. – № 1. – С. 3–7.
13. Бортников, Р.А. Разработка низкотемпературных твердотопливных газогенераторов с инертными теплообменниками: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Бортников Роман Александрович; Пермский государственный технический университет. – Пермь, 2010. – 151 л.
14. Козлова, Е.В. Расчет характеристик генератора огнетушащего аэрозоля и формируемой им высоконапорной струи для тушения нефтяных и газовых фонтанов / Е.В. Козлова, Ю.И. Карташов, С.Н. Копылов, О.И. Рогожина // Горение и взрыв. – 2024. – Т. 17, № 4 (45). – С. 46–53. – DOI: 10.30826/CE24170405. – EDN: WFFTWS.
15. Максимов, П.В. Снижение пожарной опасности генераторов огнетушащего аэрозоля с использованием профилирующей вставки для охлаждения пожаротушащей смеси / П.В. Максимов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 2 (22). – С. 44–51. – EDN: UHHSSL.
16. Карпенчук, И.В. Экспериментальные исследования генератора огнетушащего аэрозоля с газодинамическим охладителем пожаротушащей смеси для обеспечения пожарной безопасности объектов строительства / И.В. Карпенчук, И.Ю. Аушев, П.В. Максимов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2014. – № 2 (36). – С. 121–129. – EDN: WCOMXB.
17. Техника пожарная. Генераторы огнетушащего аэрозоля. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ 34635-2020. – Введ. 01.07.2023. – М.: Российский ин-т стандартизации, 2022. – IV, 21 с.
18. Патент на полез. модель ВУ 10847 U, МПК А62С 13/00 (2006.01). Генератор огнетушащего аэрозоля с охладителем пожаротушащей смеси: № 20150126; заявлено 10.04.2015; опубл. 30.10.2015 / Полевода И.И., Максимов П.В., Грачулин А.В., Зуев М.Б.; заявитель Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь. – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=12272> (дата обращения: 05.02.2025).

**Повышение пожарной безопасности и огнетушащей эффективности генератора
аэрозоля модифицированной конструкции**

**Increasing fire safety and fire extinguishing efficiency of an aerosol generator
with a modified design**

Максимов Павел Владимирович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра физической
подготовки и спорта, старший преподаватель

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

Email: maximov_pavel_01@mail.ru

SPIN-код: 2038-6062

Pavel V. Maksimov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Physical Training and Sports,
Senior Lecturer

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

Email: maximov_pavel_01@mail.ru

ORCID: 0009-0006-0846-7774

INCREASING FIRE SAFETY AND FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF AN AEROSOL GENERATOR WITH A MODIFIED DESIGN

Maksimov P.V.

Purpose. Improving fire safety during operation of a fire-extinguishing aerosol generator (FEAG), which consists of reducing the temperature of the output flow of fire-extinguishing aerosol (FEA) to values that eliminate spontaneous combustion and melting of substances and materials in the protected area, achieved by a structural method of gas-dynamic cooling.

Methods. Literature analysis; comparison of existing results of experimental and theoretical studies on reducing the outlet temperature of the fire extinguishing mixture flow of aerosol generators; comparison of an experimental sample and a serially produced generator during laboratory studies of the temperature fields of the aerosol flow and generator housings and during fire tests.

Findings. A new design method for gas-dynamic cooling of a fire-extinguishing aerosol at the outlet of a FEAG has been developed. This method consists of modifying its design with a profiling insert, made according to the type of an annular Laval nozzle with a cylindrical central body, and ensures effective extinguishing of model fires. Based on a serially produced generator, an experimental model of the FEAG, modified with the specified design gas-dynamic cooler, was manufactured, fire tests of which confirmed a decrease in the temperature of the FEA flow at the exit from the generator by 70–75 % in comparison with the serially produced generator. The time to extinguish a flame fire in a protected area during fire tests was reduced by 2 times.

Application field of research. The FEAG, modified with a gas-dynamic cooler in the form of a profiling insert, made in the style of a Laval annular nozzle with a cylindrical central body, can be effectively used as an operational means of extinguishing non-smoldering substances and materials.

Keywords: fire-extinguishing aerosol generator, solid fuel element, fire-extinguishing aerosol, Laval annular nozzle, gas-dynamic cooler, field fire tests.

(The date of submitting: October 3, 2025)

REFERENCES

1. Agafonov V.V., Bukhtoyarov D.V., Grishakina V.A., Kazakov A.V., Kopylov S.N., Golubev A.D. Obosnovanie sposobov aerazol'nogo pozharotusheniya v vysotnykh pomeshcheniyakh i sooruzheniyakh [Justification of aerosol fire extinguishing methods in high-rise rooms and structures]. *Fire Safety*, 2019. No. 4 (97). Pp. 21–31. (rus). EDN: PYOHDN.
2. Kopylov S.N., Agafonov V.V., Kopylov N.P. Evolyutsiya sredstv ob"emnogo pozharotusheniya: ot ozonorazrushayushchikh agentov do ogetushashchikh veshchestv s korotkim vremenem zhizni v atmosfere [An evolution of fire suppression tools for total flooding applications: from ozone depleting agents to substances having short period of atmospheric lifetime]. *Fire Safety*, 2012. No. 2. Pp. 123–130. (rus). EDN: PIJAOD.
3. Gatsoev K.G. Problemy aerazol'nogo pozharotusheniya [Problems of aerosol fire extinguishing]. *Fire and Explosion Safety*, 1999. Vol. 8, No. 4. Pp. 59–61. (rus)
4. Samboruk A.R. Gazogeneratsiya i aerazoleobrazovanie v sredstvakh pozharotusheniya [Gas generation and aerosol formation in fire extinguishing agents] *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2005. No. 40. Pp. 128–135. (rus). EDN: IWZIJL.
5. Agafonov V.V., Kopylov N.P. Ustanovki aerazol'nogo pozharotusheniya. Elementy, kharakteristiki, proektirovanie, montazh i ekspluatatsiya [Aerosol fire extinguishing systems: Components, specifications, design, installation, and operation] Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia, 1999. 236 p. (rus)
6. Zharkov A.S., Orionov Yu.E., Osipkov V.N. Nizkotemperaturnye gazogeneriruyushchie ustroystva v sredstvakh pozharotusheniya i avariynogo spaseniya [Low-temperature gas-generating devices in fire-fighting and emergency rescue equipment]. *Fire Safety*, 2001. No. 1. Pp. 181–184. (rus)
7. Bortnikov R.A., Potapov B.F., Serebrennikov S.Yu. Postanovka zadachi optimizatsii raboty teploobmennika v aerazol'noy sisteme pozharotusheniya [Statement of the problem of optimizing the operation of a heat exchanger in an aerosol fire extinguishing system]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004. No. 20. Pp. 8–18. (rus)
8. Kuznets E.A., Amosov A.P., Samboruk A.A. Aerazoleobrazuyushchie ogetushashchchie sostavy, generiruyushchie khloridy shchelochnykh metallov [Aerosol-forming fire extinguishing compositions generating alkali metal chlorides]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2005. No. 32. Pp. 210–211. (rus). EDN: JWUXUP.

9. Altukhov O.I., Amosov A.P., Kuznets E.A., Samboruk A.A., Frygin V.V. Ustroystvo aerazol'no-poroshkovogo pozharotusheniya [Aerosol-powder fire extinguishing device]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2010. No. 2 (27). Pp. 92–100. (rus). EDN: NCTCVH.
10. Rasenko A.A., Sedogin A.M., Anokhin K.S., Pyzhov A.M., Rekshinskiy V.A. Razrabotka nizkotemperaturnogo aerazoleobrazuyushchego sostava na osnove aktivnykh ugley [Development of a low-temperature aerosol-forming composition based on active carbons]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2007. Vol. 21, No 6 (74). Pp. 104–106. (rus). EDN: QZMIZN.
11. Korol'chenko D.A. Novoe pokolenie gazo-aerazol'nykh generatorov [New generation of gas-aerosol generators]. *Fire and Explosion Safety*, 1998. Vol. 7, No. 2. Pp. 71–74. (rus)
12. Kolomin A.E., Malinin V.I., Serebrennikov S.Yu. Vliyanie osnovnykh parametrov na protsess teploobmena v poroshkoobraznom emkostnom okhladitele [Influence of the main parameters on the heat exchange process in a powder capacitive cooler]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2004. No. 1. Pp. 3–7. (rus)
13. Bortnikov R.A. Razrabotka nizkotemperaturnykh tverdotoplivnykh gazogeneratorov s inertnymi teploobmennikami [Development of low-temperature solid fuel gas generators with inert heat exchangers]: PhD tech. sci. diss.: 05.07.05. Perm State Technical University. Perm, 2010. 151 p. (rus)
14. Kozlova E.V., Kartashov Yu.I., Kopylov S.N., Rogozhina O.I. Raschet kharakteristik generatora oagnetushashchego aerazolya i formiruemykh im vysokonapornoy strui dlya tusheniya neftyanykh i gazovykh fontanov [Calculation of characteristics of a fire-extinguishing aerosol generator and high-pressure spray for extinguishing oil and gas fountains]. *Combustion and Explosion*, 2024. Vol. 17, No. 4. Pp. 46–54. (rus). DOI: 10.30826/CE24170405. EDN: WFFTWS.
15. Maksimov P.V. Snizhenie pozharoy opasnosti generatorov oagnetushashchego aerazolya s ispol'zovaniem profiliruyushchey vstavki dlya okhlazhdeniya pozharotushashchey smesi [Reducing the fire hazard of fire extinguishing aerosol generators using a profiling insert for cooling the fire extinguishing mixture]. *Vestnik Komandno-inzhener'nogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 2 (22). Pp. 44–51. (rus). EDN: UHHCL.
16. Karpenchuk I.V., Aushev I.Yu., Maksimov P.V. Eksperimental'nye issledovaniya generatora oagnetushashchego aerazolya s gazodinamicheskim okhladitelem pozharotushashchey smesi dlya obespecheniya pozharoy bezopasnosti ob"ektov stroitel'stva [Experimental studies of a fire extinguishing aerosol generator with a gas-dynamic cooler of the fire extinguishing mixture to ensure fire safety at construction sites]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2014. No. 2 (36). Pp. 121–129. (rus). EDN: WCOMXB.
17. *Tekhnika pozhar'naya. Generatory oagnetushashchego aerazolya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy: GOST 34635-2020* [Firefighting equipment. Fire-extinguishing aerosol generators. General technical requirements. Test methods: GOST 34635-2020]. Introduced July 1, 2023. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. IV, 21 p.
18. Polevoda I.I., Maksimov P.V., Grachulin A.V., Zuev M.B. *Generator oagnetushashchego aerazolya s okhladitelem pozharotushashchey smesi* [Fire extinguishing aerosol generator with fire extinguishing mixture cooler]: utility model patent BY 10847 U. Published: October 30, 2015. Patent holder: Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus. URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=12272> (accessed: February 5, 2025).

Copyright © 2025 Maksimov P.V.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Василевич Д.В., Гуськов С.Н.

Цель. Исследование основных параметров процесса гидроабразивной резки, влияющих на ее эффективность.

Методы. В работе применены эмпирические методы исследования (определение размеров и характерных форм частиц абразивного материала), метод теоретического анализа литературных источников при определении основных параметров процесса гидроабразивной резки, влияющих на ее эффективность.

Результаты. Определены концептуальные подходы к повышению эффективности гидроабразивной резки путем изменения параметров данного процесса (давления воды, диаметра сопла, толщины и природы обрабатываемого материала, плотности, твердости, фракции и расхода абразивного материала). Проведен анализ видов и параметров абразивного материала, применяемого в гидроабразивной резке.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы установок гидроабразивной резки (для целей пожаротушения и промышленного применения) и пескоструйной очистки.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, абразивный материал, установка гидроабразивной резки.

(Поступила в редакцию 8 октября 2025 г.)

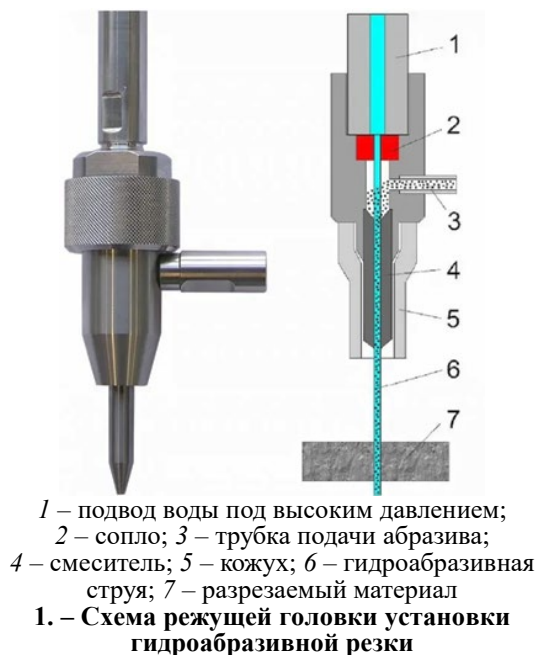
Введение

Абразивная резка – процесс обработки и разделения материалов с использованием абразивных частиц, которые за счет высокой твердости и скорости движения снимают микрослои материала. Методы абразивной резки делятся на механические (резка диском) и с применением свободного абразива, разгоняемого потоком воздуха (абразивно-струйная, либо пескоструйная) или воды (гидроабразивная). Существует два вида резки с применением воды: гидрорезка и гидроабразивная резка [1].

Вид обработки материала методом резания, при котором режущим инструментом выступает не резец, а струя воды либо струя воды, смешанная с абразивным материалом, которая под высоким давлением (200–600 МПа) и с большой скоростью испускается по направлению к обрабатываемой поверхности, называется гидроабразивной резкой. Аналогичный процесс встречается и в природе, т.е. происходит без участия человека, и имеет название «водная эрозия» [1]. Исследованию процесса гидроабразивной резки посвящено множество работ ученых по всему миру [2–12].

В промышленных установках насос высокого давления нагнетает воду по трубкам высокого давления в режущую головку. В режущей головке вода проходит через сопло 2, превращаясь в тонкую струю (рис. 1). Через трубку подачи абразива 3 абразив поступает в смеситель 4, и в выходном сечении режущей головки формируется гидроабразивная струя 6, способная резать практически любой материал¹.

Тушение скрытых и труднодоступных очагов пожара является одной из наиболее сложных задач при проведении аварийно-спасательных работ. Такие очаги формируются



¹ Гидроабразивная резка – объяснение процесса, преимущества и материалы [Часть 1] // Станки и инструмент для бизнеса – Станкофф.RU: [сайт]. – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/690> (дата обращения: 29.09.2025).

в конструктивных полостях зданий (между кровельным покрытием и стропильной системой, в фальшполах, между облицовкой стен и самой стеной и т.д.). При использовании классического способа пожаротушения в таких местах для обнаружения очага пожара необходимо произвести вскрытие и разборку конструкций с последующим тушением.

Данный способ является трудо- и экономически затратным, поскольку необходимо приложить значительные усилия для вскрытия и разборки конструкций, а после тушения выполнить восстановительные работы. Поэтому технология гидроабразивной резки нашла применение в области пожаротушения.

Сущность данного процесса заключается в том, чтобы с помощью гидроабразивной струи пробить отверстие (диаметром до 3 мм) в стене или двери горящего помещения. При появлении сквозного отверстия в ограждающей конструкции подача в струю абразивного материала прекращается и внутрь помещения через образованное отверстие поступает только вода. Это позволяет снизить среднеобъемную температуру в помещении, что, в свою очередь, даст возможность пожарным зайти внутрь помещения и произвести дотушивание очагов горения, максимально обезопасив себя от воздействия высоких температур и возможных последствий от развившегося пожара. Кроме того, быстрое снижение температуры происходит без поступления в зону горения значительного количества воздуха (например, при открытии двери), что уменьшает вероятность развития пожара и выброса пламени вследствие образования обратной тяги.

Преимущество описываемой технологии заключается и в ее экологичности и пожаробезопасности – в процессе гидроабразивной резки исключено искрообразование, выступающее в роли источника зажигания, плавление или горение обрабатываемого материала. Cold Cut Cobra Швеция, PyroLance fire fighting system США (далее – PyroLance), Гюрза (Россия) – это системы, работающие по вышеупомянутому принципу (рис. 2) [13].



а – демонстрация работы установки «Гюрза»



б – подача огнетушащих веществ через стену установкой PyroLance

Рисунок 2. – Установки пожаротушения с возможностью гидроабразивной резки

Установка пожаротушения Cold Cut Cobra применялась на территории Республики Беларусь, однако стоимость самой установки, сложность и стоимость работ по техническому обслуживанию и ремонту, требования к качеству воды (отсутствию примесей) отрицательно повлияли на применение установок подобного рода в целом.

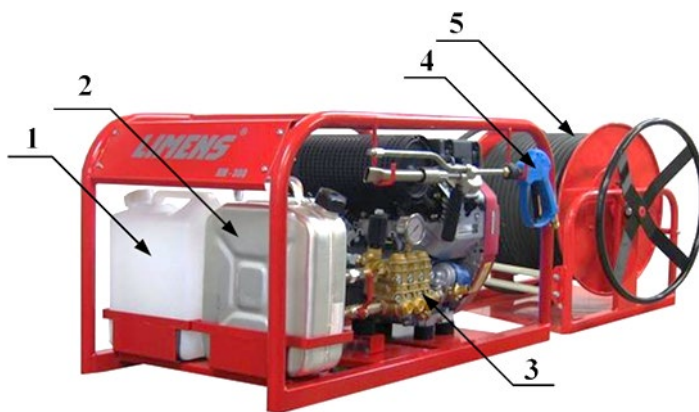
На данный момент на вооружении Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь находятся установки пожаротушения Limens (рис. 3), которые подают воду на тушение под высоким давлением.

Технические характеристики установки Limens представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Технические характеристики установки Limens

Наименование	Технические характеристики
Рабочее давление системы	15 МПа
Расход воды	30 л/мин

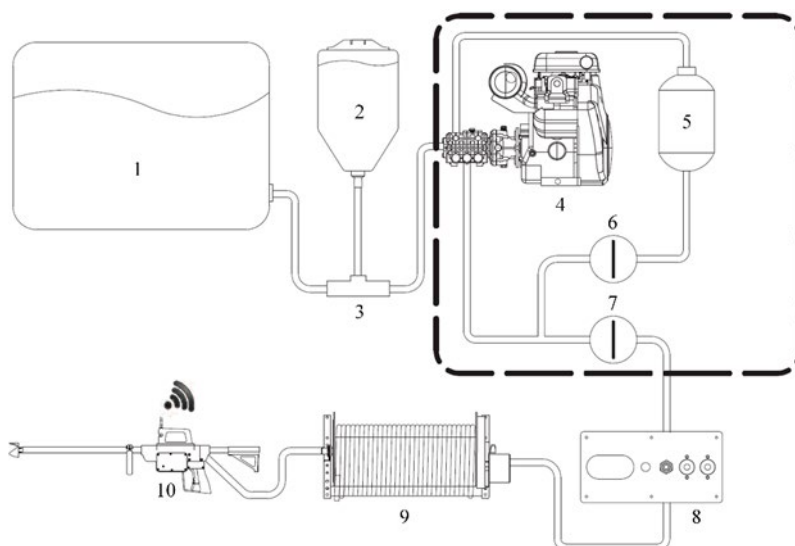
Данная установка не рассчитана на подачу абразива и, соответственно, не предназначена для гидроабразивной резки. Однако при доработке конструкции Limens, а именно ствола высокого давления, теоретически возможно добавить функцию гидроабразивной резки.



1 – бак для пенообразователя; 2 – топливный бак; 3 – плунжерный насос;
4 – ствол высокого давления; 5 – шланг высокого давления

Рисунок 3. – Установка пожаротушения Limens

Рассмотрим принцип работы установки пожаротушения PyroLance. Вода из емкости 1 через клапан 3 поступает в плунжерный насос 4. При тушении пожара вода из плунжерного насоса 4 поступает по трубопроводу через кран 7 на рукав высокого давления 9 и далее на ствол высокого давления 10. При необходимости добавления абразивного материала вода из насоса 4 также поступает в емкость для абразивного материала 5, забирает необходимое количество абразива и через шаровые краны 6 и 7 поступает в ствол высокого давления 10 по шлангу высокого давления (рис. 4).



1 – емкость для воды; 2 – емкость с охлаждающей жидкостью; 3 – клапан; 4 – плунжерный насос;
5 – емкость для абразивного материала; 6, 7 – кран шаровый с электроприводом; 8 – панель управления;
9 – шланг высокого давления; 10 – ствол высокого давления

Рисунок 4. – Схема работы установки пожаротушения PyroLance²

Такая конструкция позволяет, с одной стороны, разгонять абразив по всей длине шланга высокого давления до своей максимальной скорости и, соответственно, осуществлять гидроабразивную резку с максимальной эффективностью, с другой стороны, шланг высокого давления достаточно быстро изнашивается, поскольку абразив, проходя по нему, разрушает его внутренний слой.

Предлагаемая доработка конструкции Limens заключается в том, что абразив будет поступать в струю воды именно в стволе высокого давления (как и в промышленных установках гидроабразивной резки). Это позволит значительно упростить конструкцию (исключить емкость для абразивного материала, шаровые краны с электроприводом) и продлить срок эксплуатации шланга высокого давления.

² PyroLance L 1000 W-G Technical Manual: technical manual / PyroLance North America LLC. – Aurora (Col.), 2013. – 51 p.

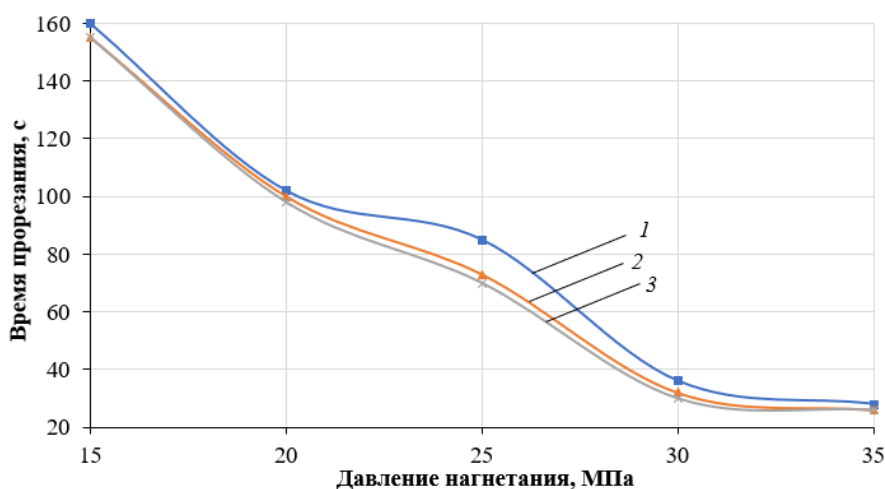
Для реализации такой доработки необходимо оптимизировать основные параметры установки пожаротушения Limens и определить оптимальные характеристики абразивного материала, которые будут влиять на эффективность гидроабразивной резки.

Основная часть

Вода в гидроабразивной резке выполняет функцию ускоряющей среды, передающей кинетическую энергию абразивным частицам. Основное разрушение материала происходит за счет удара твердых частиц абразива, которые, обладая высокой плотностью, твердостью и скоростью, вызывают локальную деформацию и разрушение материала.

Давление воды. При повышении давления увеличивается скорость струи. За счет этого повышается кинетическая энергия абразивных частиц, соответственно, они глубже врезаются в материал. Однако излишне высокое давление ускоряет износ режущей головки и повышает стоимость технического обслуживания оборудования в целом.

При проведении исследований по определению оптимальных параметров гидроабразивной струи было установлено, что при сквозном прорезании заготовки из стали Ст.3 (толщиной 3 мм) оптимальное давление составляет 30 МПа [14]. Однако проведенные исследования показали, что резка осуществляется и при давлении 15 МПа (рис. 5).



1 – концентрация песка 100 кг/м³; 2 – концентрация песка 150 кг/м³; 3 – концентрация песка 200 кг/м³

Рисунок 5. – Зависимость времени сквозного пробития от давления нагнетания

Диаметр сопла. В промышленных установках гидроабразивной резки диаметр сопла находится в диапазоне 0,1–0,5 мм. Чем меньше диаметр сопла, тем выше скорость струи, меньше расход воды и абразива. Широкое сопло обеспечит больший расход воды и абразива, однако скорость струи уменьшается (при одинаковых параметрах насоса). При выборе диаметра сопла в установке пожаротушения необходимо учитывать и тот фактор, что при слишком узком сопле малое количество воды может не обеспечить тушение пожара.

Расход абразивного материала. Расход абразивного материала в установках гидроабразивной резки составляет примерно 300 г в минуту. Однако он может изменяться в зависимости от толщины и типа разрезаемого материала. Небольшое количество подаваемого абразива увеличивает время резки. При увеличении расхода время резки уменьшается. Однако есть предел: большое количество абразива будет сильно тормозить струю, вплоть до невозможности осуществлять резку. Поэтому для эффективной резки и экономии абразива его количество необходимо выбирать с высокой точностью.

Толщина прорезаемого материала. Чем толще заготовка, тем дольше частицы должны сохранять энергию для разрушения материала. Соответственно, необходимо увеличивать скорость гидроабразивной струи для получения сквозного отверстия. Заранее известная толщина прорезаемого материала позволит точно подобрать параметры установки гидроабразивной резки. Однако при ликвидации чрезвычайных ситуаций толщина и состав прорезаемых материалов неизвестны.

Свойства прорезаемого материала. Чем выше прочность, плотность и твердость, тем больше сопротивление гидроабразивной струе и медленнее осуществляется резка. Хрупкие материалы, наоборот, разрушаются быстро. Вязкие материалы поглощают часть энергии струи, из-за чего время реза может увеличиться.

Размер, форма и твердость зерна абразивного материала. Время прорезания напрямую зависит от формы и размеров зерна абразива, его твердости, плотности и скорости в момент удара. Острые частицы образуют меньшую площадь контакта, что увеличивает давление в зоне удара. Круглые частицы с большей площадью контакта, в свою очередь, подходят для полировки материала. Крупные частицы имеют большую массу, следовательно, и большую кинетическую энергию, однако для разгона такой частицы необходимо увеличить и скорость струи воды. При недостаточной энергии струи ее фокусировка будет снижаться, что приведет к снижению эффективности резки. Мелкие частицы, в свою очередь, обладают меньшей кинетической энергией, однако фокусировка струи в большей степени остается неизменной. Чем выше твердость, тем глубже и агрессивнее частицы проникают в материал, соответственно, требуется меньше времени на прорезание при прочих равных. Плотность напрямую влияет на массу частицы, а значит, и на величину кинетической энергии. Но слишком тяжелые или твердые частицы (например, стальные, алмазные) могут быстро изнашивать сопло или плохо перемешиваться со струей.

При проведении анализа вида применяемого абразивного материала было установлено, что в установках гидроабразивной резки (промышленных и применяемых для тушения пожаров) и в установках пескоструйной обработки применяется следующий абразивный материал: гранатовый песок, электрокорунд, карбид кремния, кварцевый песок, песок, купершлак. Исследование формы, фракции и внешнего вида частиц, а также наличия примесей проводилось с помощью микроскопа цифрового Levenhuk D320L. Зернистость определялась по классификации FEPA (The Federation of the European Producers of Abrasives).

Гранатовый песок (рис. 6). Гранатами называют группу минералов, схожих по кристаллическому строению и физико-химическим свойствам. Гранат применяется в разных отраслях – строительной, промышленной, автомобильной, газовой, нефтедобывающей и др.

Песок для гидроабразивной резки очищен от посторонних примесей и выдержан в рамках одной фракции, чтобы исключить повреждение режущей головки и повысить производительность установки гидроабразивной резки. Гранатовый песок – эффективный инструмент в области пескоструйной и гидроабразивной обработки. Свое название он получил за сходство формы песчинок с зернами граната. Самый распространенный тип гранатового песка – альмандин. Химическая формула $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$.

Отличается высокой твердостью, химической инертностью и устойчивостью к разрушению, что делает его безопасным и эффективным в эксплуатации. Используется в качестве абразива при гидроабразивной резке металла, камня, стекла, керамики и других материалов. Форма частиц – остроугольная. Наиболее часто используемая фракция для гидроабразивной резки – Mesh 80³.

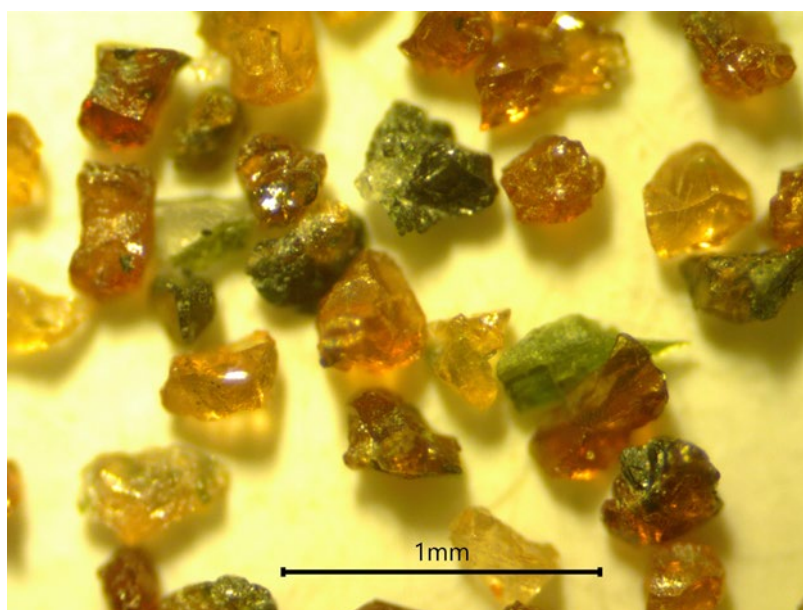


Рисунок 6. – Гранатовый песок (Mesh 80)

³ Применение различных фракций гранатового песка // Р-ГАРНЕТ: [сайт]. – СПб.: АО «Р-Гарнет», 2019. – URL: <https://r-garnet.ru/articles/primenenie-razlichnykh-fraktsiy-granatovogo-peska/> (дата обращения: 29.09.2025).

Электрокорунд (рис. 7). Искусственно созданный кристаллический оксид алюминия (глинозем), получаемый путем переплавки глиноземного сырья в дуговых печах. Представляет собой сверхтвердый абразивный материал. Химическая формула Al_2O_3 . Форма частиц – остроугольная. Используется для изготовления шлифовальных инструментов и для обработки различных поверхностей, включая металлы, камень и стекло⁴.

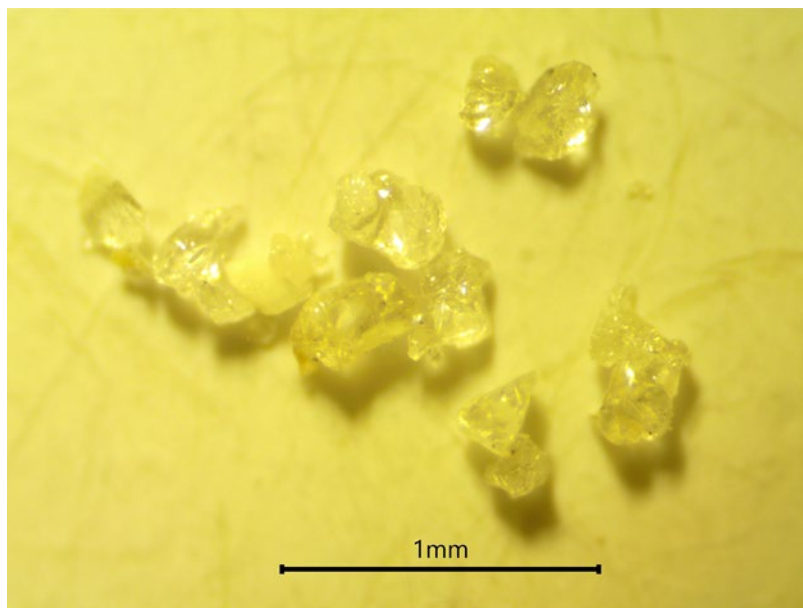


Рисунок 7. – Электрокорунд белый

Карбид кремния (рис. 8). Бинарное неорганическое химическое соединение кремния с углеродом. Химическая формула SiC . В природе встречается в виде чрезвычайно редкого минерала – муассанита. Искусственным путем порошок карбида кремния получают в печи Ачесона. Карбид кремния – это керамический материал с очень высокой твердостью.

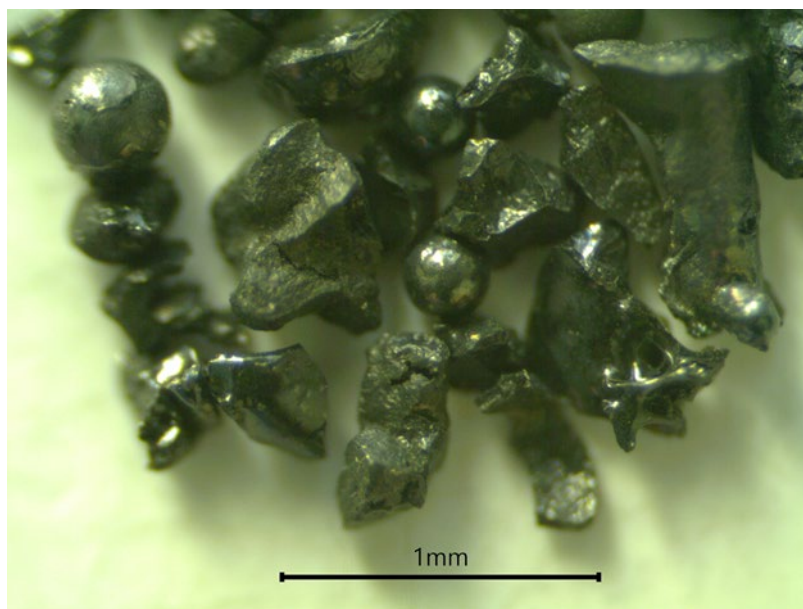


Рисунок 8. – Карбид кремния (зернистость F22–F150)

Материал обладает высокой износостойкостью и химической инертностью ко всем щелочам и кислотам. Форма частиц остроугольная. Эти свойства делают карбид кремния превосходным абразивным и керамическим материалом для использования в экстремальных условиях

⁴ Виды электрокорунда // prom.by: [сайт]. – Минск, ООО «Промбай Абразив», 2019. – URL: <https://prom.by/informacziya/spravochnik/vidyi-elektrokورونا/> (дата обращения: 29.09.2025).

эксплуатации. Карбид кремния более высокой твердости и режущей способности применяется для производства абразивного инструмента и для свободного шлифования⁵.

Кварцевый песок (рис. 9). Твердый абразивный материал природного происхождения, получаемый открытой добычей из карьеров и обводненных речных русел или с помощью дробления кварца. Химическая формула SiO_2 . Это минерал, количество которого в природе является преобладающим. Форма частиц – округлая. Средняя зернистость кварцевого песка (F40–F60) востребована для фильтровальных целей, пескоструйных работ, очищения жидкостей, изготовления смесей строительного назначения, растворов из бетона, создания наливных полов.

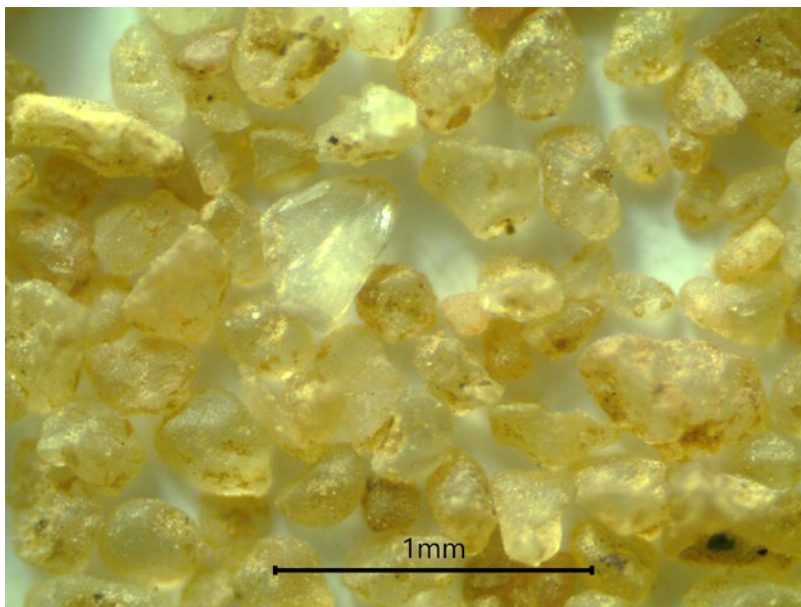


Рисунок 9. – Кварцевый песок (зернистость F36–F150)

Купершлак (рис. 10). Гранулированный порошок, применяемый для пескоструйной обработки поверхностей и изделий из металла, камня, кирпича и бетона. Его химический состав колеблется в зависимости от конкретного производства, но в основном включает оксиды железа (Fe_2O_3 , FeO), кварцевый песок (SiO_2), а также в меньших количествах оксиды алюминия (Al_2O_3), магния (MgO) и кальция (CaO). Форма частиц – остроугольная.

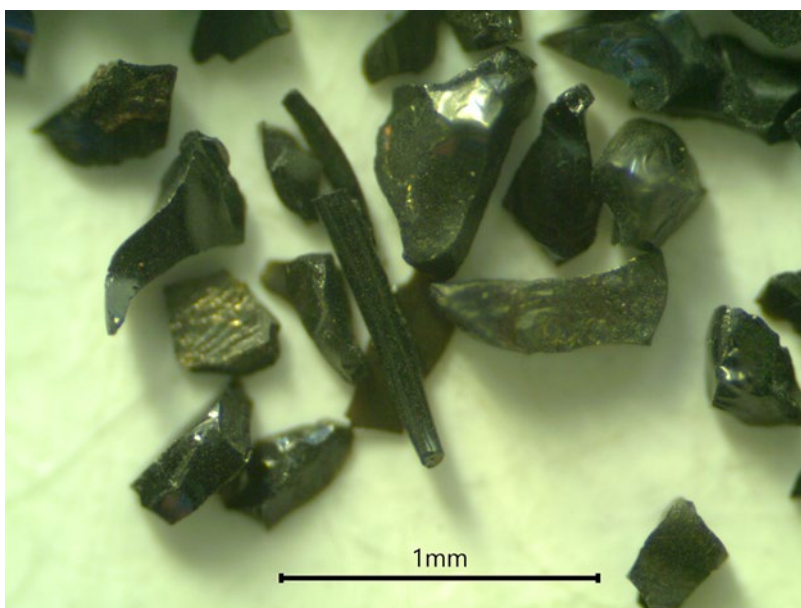


Рисунок 10. – Купершлак (зернистость F22–F150)

⁵ Карбид кремния // vabz.ru: [сайт]. – Волжский, ОАО «Волжский абразивный завод», 1961–2025. – URL: <https://vabz.ru/production/silicon-carbide/podrobnее-o-karbide-kremniya/> (дата обращения: 29.09.2025).

Изготавливается из отходов медеплавильного производства и является неметаллическим синтетическим абразивным средством минерального происхождения. В результате дробления, просева, а затем промывания и сушки на выходе получают гранулы высокой динамической прочности. В купершлаке незначительное количество пыли и практически полностью отсутствуют водорастворимые соли и иные примеси.

Песок. Основное отличие кварцевого песка от карьерного или речного – высокая степень чистоты, однородность состава и отсутствие примесей, таких как глина и органические вещества. Речной песок, например, содержит посторонние включения (рис. 11), что снижает его качество и сужает сферу применения. Форма частиц – округлая.



Рисунок 11. – Речной песок (зернистость F22–F150)

Гранитная крошка (рис. 12). Отсев из материалов дробления горных пород – это мелкая фракция (обычно до 10 мм) каменного материала, получаемая как побочный продукт при дроблении и сортировке горных пород (щебня). У гранита нет единой химической формулы, т.к. это горная порода, состоящая из смеси минералов, в основном кварца (SiO_2), полевых шпатов (например, KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) и слюды (биотит, мусковит). Он используется как экономически выгодная альтернатива природному песку в строительстве, производстве бетона, а также в ландшафтном дизайне для отсыпки дорожек и декоративных целей.

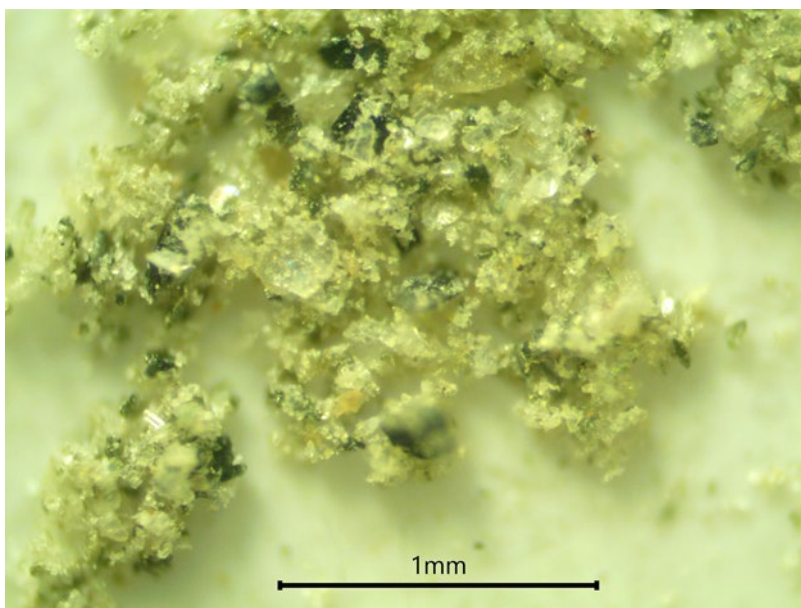


Рисунок 12. – Гранитная крошка

На территории Беларуси располагается Республиканское унитарное производственное предприятие «Гранит», которое является крупнейшим предприятием в Европе по добыче и переработке плотных горных пород. При переработке щебня образуется фракционированный отсев (зернистость F60 и выше, в преобладающем большинстве частицы мелкие (зернистость F100) и острые), предназначенный для применения в качестве мелкого заполнителя для бетонов, заполнителя для строительных растворов и для дорожного строительства. По своим характеристикам данный отсев возможно применять и в качестве абразивного материала в гидроабразивной резке.

В таблице 2 приведены основные параметры абразивных материалов.

Таблица 2. – Основные параметры абразивного материала

Вид абразива	Плотность, кг/м ³	Твердость по Моосу	Возможность повторного применения	Ориентировочная стоимость (на октябрь 2025 г.), бел. руб. / кг
Гранатовый песок	4100	7–7,5	да	2,69
Электрокорунд	3950	9	да	4,80
Карбид кремния	3200	9,1–9,5	да	7,62
Кварцевый песок	2650	7	нет	0,60
Купершлак	3900	6,5	да	0,72
Песок	2700	до 7 ¹	нет	бесплатно ²
Гранитная крошка	2700	6–7	нет	бесплатно ²

Примечание. ¹ Твердость у обычного песка зависит от примесей, содержащихся в нем.

² Без учета доставки.

В промышленных установках гидроабразивной резки существует возможность собрать использованный абразивный материал для его повторного применения. Однако при ликвидации чрезвычайных ситуаций такой возможности нет. Это необходимо учитывать при выборе абразивного материала, его применении в установках тушения пожаров с возможностью гидроабразивной резки.

Заключение

Технология гидроабразивной резки демонстрирует значительный потенциал применения для тушения скрытых и труднодоступных очагов пожара. Теоретический анализ подтверждает принципиальную возможность и практическую целесообразность внедрения данной технологии в практическую деятельность спасательных подразделений для повышения оперативности и безопасности работ по тушению сложных пожаров.

Установлено, что находящиеся на вооружении МЧС Беларуси установки пожаротушения Limens, обладая рабочим давлением 15 МПа, после соответствующей модернизации ствола высокого давления могут быть адаптированы для осуществления гидроабразивной резки. Предлагаемое конструктивное решение (подача абразивного материала непосредственно в ствол высокого давления) позволяет упростить систему, повысить долговечность рукава высокого давления.

Эффективность гидроабразивной резки обеспечивается за счет ее оптимальных параметров (скорость гидроабразивной струи, геометрические и физические параметры абразивного материала), при которых достигается оптимальное время сквозного пробития материала. В результате аналитического обзора определено, что такие свойства, как твердость, плотность, форма и размер частиц абразивного материала напрямую влияют на время пробития преграды. С экономической и практической точек зрения перспективным представляется использование гранитной крошки предприятия «Гранит», которая по фракционным и прочностным характеристикам может являться конкурентоспособной альтернативой традиционным абразивам.

Выбор оптимального размера и расхода абразивных частиц зависит от расхода и давления воды, выходящей из сопла. Уменьшение расхода и размера абразивных частиц увеличит время гидроабразивной резки. При увеличении расхода и размера абразивных частиц время гидроабразивной резки будет сокращаться. Однако существует предел для увеличения расхода и размера абразивных частиц, при достижении которого энергии воды, выходящей из сопла, будет недостаточно для придания абразивным частицам требуемой скорости, вследствие чего скорость гидроабразивной резки будет уменьшаться, стремясь к нулю. Для определения предела, при котором время гидроабразивной резки будет минимальным, необходимо установить зависимость между давлением и расходом воды, размером и расходом

абразивного материала от времени гидроабразивной резки (оптимальные режимы резания). Определение этих параметров, а также вида оптимального абразива для различных материалов (бетона, кирпича, металла, древесины) требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпаченко, К.А. Гидроабразивная резка: принцип работы, область применения и преимущества технологии / К.А. Карпаченко // *Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике*. – 2020. – Т. 28, № 3 (17). – С. 100–105. – EDN: VDUVZX.
2. Шпилев, В.В. Моделирование двухкомпонентной струи жидкости при гидроабразивной резке / В.В. Шпилев // *Современные научные исследования: теория и практика: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, София, Болгария, 21 окт. 2017 г.* – Нефтекамск: Мир науки, 2017. – С. 122–128. – EDN: XWITNC.
3. Иванов, Ю.Г. Выбор оптимальной скорости резки для раскроя плиты Д16 толщиной 120 мм при помощи гидроабразивной резки / Ю.Г. Иванов, М.В. Яковицкая // *Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 г.* – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – Часть 2. – С. 226–228. – EDN: XLKSXT.
4. Патент RU 2508189 C1, МПК В26F 3/00 (2006.01), В23D 31/00 (2006.01). Установка гидроабразивной резки: № 2012145204/02: заявлено 25.10.2012: опубл. 27.02.2014 / Ю.П. Астахов, А.Н. Королев, М.Б. Жихарев, С.М. Волков; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение “Техномаш”». – EDN: ZFMHHV.
5. Гарагуля, Д.В. Преимущества гидроабразивной резки при раскрое листового металла / Д.В. Гарагуля // *Морской вестник*. – 2017. – № 4 (64). – С. 37–38. – EDN: ZUQMKL.
6. Алешков, М.В. Определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, применяемых на объектах энергетики / М.В. Алешков, И.А. Гусев // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2017. – Т. 26, № 10. – С. 69–76. – DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76. – EDN: ZUFYCN.
7. Тамаркин, М.А. Технологические особенности гидроабразивной резки листовых композиционных материалов / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.В. Верченко, А.Г. Коханюк // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2019. – Т. 2. – С. 191–194. – EDN: ZULBMO.
8. Николаев, П.А. Комплексный анализ процесса гидроабразивной резки / П.А. Николаев // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: материалы XLV Научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО: в 5 т., Санкт-Петербург, 2–6 фев. 2016 г.* – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016. – Т. 4. – С. 48–50. – EDN: ZOPAOB.
9. Вавилов, Д.В. Гидроабразивная резка металла / Д.В. Вавилов // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 1–30 мая 2015 г.* – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 1255–1257. – EDN: USQGJF.
10. Putz, M. Suspension technology for abrasive waterjet (AWJ) cutting of ceramics / M. Putz, M. Dix, F. Morczinek, M. Dittrich // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 367–370. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.037.
11. Karmiris-Obratański, P. Experimental study on the correlation of cutting head vibrations and kerf characteristics during abrasive waterjet cutting of titanium alloy / P. Karmiris-Obratański, N.E. Karkalos, R. Kudelski, E.L. Papazoglou, A.P. Markopoulos // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 101. – P. 226–229. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.011.
12. Dadgar, M. Reduction of taper angle and jet trailback in waterjet cutting of complex geometries by a revised model of the process control / M. Dadgar, T. Schreiner, M. Schuler, T. Herrig, T. Bergs // *Procedia CIRP*. – 2023. – Vol. 117. – P. 20–25. – DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.005.
13. Василевич, Д.В. Перспективные средства тушения пожаров с применением установок подачи огнетушащих веществ высокого давления / Д.В. Василевич, В.В. Лахвич, Д.С. Миканович // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 283–290. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.283. – EDN: YNKICX.
14. Добровольский, И.В. Выбор оптимальных режимов гидроабразивного резания металла / И.В. Добровольский, М.М. Лях // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2016. – № 4 (50). – С. 58–60. – EDN: VXCMVP.

Применение гидроабразивной резки при ликвидации чрезвычайных ситуаций
The use of waterjet cutting in emergency response

Василевич Дмитрий Владимирович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники,
старший преподаватель

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

Email: dzmitry112vasilevich@gmail.com

SPIN-код: 4807-8940

Dmitriy V. Vasilevich

PhD in Technical Sciences

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

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

Email: dzmitry112vasilevich@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1976-0344

Гуськов Сергей Николаевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники,
преподаватель

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

Email: guskov.serezha0910@gmail.com

Sergey N. Gus'kov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Rescue Equipment,
Lecturer

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

Email: guskov.serezha0910@gmail.com

ORCID: 0009-0001-1131-1950

THE USE OF WATERJET CUTTING IN EMERGENCY RESPONSE

Vasilevich D.V., Gus'kov S.N.

Purpose. Study of the main parameters of the waterjet cutting process that affect its efficiency.

Methods. The work uses empirical research methods (determination of the sizes and characteristic shapes of abrasive material particles), a method of theoretical analysis of literary sources in determining the main parameters of the waterjet cutting process that affect its efficiency.

Findings. Conceptual approaches to improving the efficiency of waterjet cutting by varying process parameters (water pressure, nozzle diameter, thickness and nature of the workpiece, density, hardness, fraction, and flow rate of the abrasive material) are identified. An analysis of the types and parameters of abrasive material used in waterjet cutting is conducted.

Application field of research. The obtained results can be used to improve the efficiency of waterjet cutting (for fire extinguishing and industrial applications) and sandblasting systems.

Keywords: waterjet cutting, abrasive material, waterjet cutting machine.

(The date of submitting: October 8, 2025)

REFERENCES

1. Karpachenko K.A. Hidroabrazivnaya rezka: printsip raboty, oblast' primeneniya i preimushchestva tekhnologii [Waterjet cutting: principle of operation, scope and advantages of technology]. *Innovative Technologies in Machine-Building, Education and the Economy*, 2020. Vol. 28, No. 3 (17). Pp. 100–105. (rus). EDN: VDUVZX.
2. Shpilev V.V. Modelirovanie dvukhkompontentnoy strui zhidkosti pri gidroabrazivnoy rezke [Modeling of a two-component fluid jet in waterjet cutting]. *Proc. of Intern. (correspondence) scientific-practical conf. «Sovremennye nauchnye issledovaniya: teoriya i praktika»*, Sofia, Bulgaria, Oktober 21, 2017. Neftekamsk: Mir nauki, 2017. Pp. 122–128. (rus). EDN: XWITNC.
3. Ivanov Yu.G., Yakovitskaya M.V. Vybora optimal'noy skorosti rezki dlya raskroya plity D16 tolshchinoy 120 mm pri pomoshchi gidroabrazivnoy rezki [Selection of the optimal cutting speed for cutting D16 plate with a thickness of 120 mm using waterjet cutting]. *Proc. of Scientific conference with international participation «Nedelya nauki SPbPU»*, Saint Petersburg, November 13–19, 2017. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2017. Part 2. Pp. 226–228. (rus). EDN: XLKSXT.
4. Astakhov Yu.P., Korolev A.N., Zhikharev M.B., Volkov S.M. *Ustanovka gidroabrazivnoy rezki* [Waterjet cutting installation]. Patent RU 2508189 C1. Published on February 27, 2014. Patent holder: Scientific and Production Association «Tekhnomash». (rus). EDN: ZFMHHV.
5. Garagulya D.V. Preimushchestva gidroabrazivnoy rezki pri raskroe listovogo metalla [Advantages of waterjet cutting when cutting sheet metal]. *Morskoy Vestnik*, 2017. No. 4 (64). Pp. 37–38. (rus). EDN: ZUQMKL.
6. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Opredelenie rabochikh parametrov ustanovok pozharotusheniya s vozmozhnostyami gidroabrazivnoy rezki, primenyaemykh na ob'ektakh energetiki [Determination of working parameters of the installations of fire extinguishing with opportunities of hydroabrasive cutting applied on power objects]. *Fire and Explosion Safety*, 2017. Vol. 26, No. 10. Pp. 69–76. (rus). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76. EDN: ZUFYCN.
7. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Verchenko A.V., Kokhanyuk A.G. Tekhnologicheskie osobennosti gidroabrazivnoy rezki listovykh kompozitsionnykh materialov [Technological features of waterjet cutting of sheet composite materials]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2019. Vol. 2. Pp. 191–194. (rus). EDN: ZULBMO.
8. Nikolaev P.A. Kompleksnyy analiz protsessa gidroabrazivnoy rezki [Comprehensive analysis of the waterjet cutting process]. *Proc. of the XLV Scientific and educational-methodological conference of ITMO University «Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University»: in 5 vol., St. Petersburg, February 2–6, 2016*. St. Petersburg: Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2016. Vol. 4. Pp. 48–50. (rus). EDN: ZOPA0B.
9. Vavilov D.V. Hidroabrazivnaya rezka metalla [Waterjet cutting of metal]. *Proc. of Intern. scientific-technical conference of young scientists of the BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, May 1–30, 2015*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. Pp. 1255–1257. (rus). EDN: USQGJF.
10. Putz M., Dix M., Morczinek F., Dittrich M. Suspension technology for abrasive waterjet (AWJ) cutting of ceramics. *Procedia CIRP*, 2018. Vol. 77. Pp. 367–370. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.037.

11. Karmiris-Obratański P., Karkalos N.E., Kudelski R., Papazoglou E.L., Markopoulos A.P. Experimental study on the correlation of cutting head vibrations and kerf characteristics during abrasive waterjet cutting of titanium alloy. *Procedia CIRP*, 2021. Vol. 101. Pp. 226–229. DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.011.
12. Dadgar M., Schreiner T., Schuler M., Herrig T., Bergs T. Reduction of taper angle and jet trailback in waterjet cutting of complex geometries by a revised model of the process control. *Procedia CIRP*, 2023. Vol. 117. Pp. 20–25. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.005.
13. Vasilevich D.V., Lakhvich V.V., Mikanovich D.S. Perspektivnye sredstva tusheniya pozharov s primeneniem ustanovok podachi ognetchashchikh veshchestv vysokogo davleniya [Promising means of fire extinguishing agents using high-pressure installations]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 283–290. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.283. EDN: YNKICX.
14. Dobrovolskiy I.V., Lyakh M.M. Vybor optimal'nykh rezhimov gidroabrazivnogo rezanii metalla [Selection of optimal modes for waterjet metal cutting]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2016. No. 4 (50). Pp. 58–60. (rus). EDN: VXCMVP.

Copyright © 2025 Vasilevich D.V., Gus'kov S.N.

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

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВНЫХ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГОЛОВЫ

Иванов Ю.С., Кашанкова В.В.

Цель. Обоснование уровня защитных свойств и конструктивного исполнения отечественного шлема пожарного-спасателя.

Методы. Методы теоретического познания: анализ, синтез, индукция и обобщение.

Результаты. В результате анализа исследований по изучению основных защитных свойств средств индивидуальной защиты (СИЗ) головы установлены основные виды опасностей при травмах головы, их критические значения, установлены факторы, оказывающие влияние на прочностные свойства и конструкцию корпуса шлема. Определены перспективные методы исследования в области проектирования и разработки СИЗ головы.

Область применения исследований. Разработка современных отечественных СИЗ.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты головы, травма головы, шлем/каска, защитные свойства.

(Поступила в редакцию 19 сентября 2025 г.)

Введение

В соответствии со статистическими данными производственного травматизма за 2020 г. травмы головы и шеи составили около 8 и 6,6 % от общего количества несчастных случаев в ЕС и США соответственно [1]. Согласно данным Национальной ассоциации противопожарной защиты США, 9 % травм, полученных пожарными за 2017–2021 гг. (по среднегодовому показателю), приходилось на травмы головы [2]¹. Основные причины получения таких травм – падение предметов, обрушение конструкций и падение работников на скользкой поверхности. Очевидно, что шлем/каска является неотъемлемым элементом экипировки не только пожарных, спасателей, но и представителей других профессий, связанных с риском получения травмы головы (лесозаготовительная, топливная промышленность, строительство и др.).

Разработка современного СИЗ головы с высоким уровнем защитных свойств и оптимальными конструктивными решениями требует проведения исследований в области биомеханики травмы головы. Настоящая работа посвящена обобщению последних достижений в области решения этой актуальной научно-практической задачи.

Основная часть

Шлемы и каски используются для защиты от ударов еще со времен античности. Основное предназначение СИЗ головы – защита головы при падении, от падающих предметов и ударов. При этом указанные СИЗ должны обладать механической прочностью (характеризуется способностью сопротивляться различным внешним механическим воздействиям) и амортизационной способностью (характеризуется величиной усилия, передаваемого шлемом/каскай на модель головы при ударе определенной энергии) [3]. Научному обоснованию данных защитных свойств (в большей степени касок строительных) было посвящено немалое количество научных трудов.

Механическая прочность и амортизационная способность в большей степени определяют выбор конструкции и материала каски [3]. В целях обоснования требований к уровню механической прочности и амортизационной способности СИЗ головы начиная с 50-х гг. XX в. был проведен ряд исследований по изучению последствий воздействия на организм человека различного рода травм головы. Данному вопросу посвящены научные работы по биомеханике травмы (механизм, характер воздействия и повреждений в зависимости от параметров ударного воздействия) головы, наибольший интерес из которых представляют работы А.П. Громова [4], в том числе написанные в соавторстве [5; 6], Х.Е. Фон Гирке

¹ Бойко, И. История и устройство пожарной охраны США / И. Бойко, М. Сафроненко // Пожару.нет. – 2021. – 1 апр. – URL: https://shop-pozharu.net/info/articles/2021/istoriya_i_ustroystvo_pozharnoy_okhrany_ssha/ (дата обращения: 18.09.2025).

и Дж.В. Бринкли [7], R.W. Webster [8], T.D. Proctor [9], A. Mayer и S. Salsi [10], F.J. Rowland, A.A. Scalone и C. Orlando [11], С.А. Корсакова [12], Г.В. Недугова [13] и др. Полученные советскими учеными данные [4] позволили установить зависимость между тяжестью повреждений и параметрами ударного воздействия, обосновать эффективность СИЗ головы и требования к ним (разработаны специальные ГОСТ СССР для защитных касок).

В ходе исследований, проведенных научным коллективом с участием А.П. Громова, установлено 3 вида опасности при ударе предметом по голове: разрушение костей черепа, повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга [4]. Полученные результаты в [4] приводятся в сравнении с показателями, полученными зарубежными авторами. В частности, разрушение костей черепа в соответствии с работой R.W. Webster [4; 8] наступает при ударе энергией 4,5–5,5 кгс/м (44–54 Дж). Для уточнения приведенных показателей А.П. Громовым совместно со специалистами в области судебной экспертизы, биофизики и другими учеными были проведены исследования по определению «критических нагрузок на голову человека в защитной каске» [4]. В рамках данного исследования осуществлялось изучение последствий концентрированного и распределенного удара (удара по незащищенной и защищенной голове). В отличие от изысканий Е.Т. Трубникова [14] проводились биомеханические исследования. Установлено, что повреждение костей черепа происходит при энергии концентрированного удара в 5,25 кгс/м (51,5 Дж). Эти результаты согласуются с результатами, полученными американскими учеными Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли [7], но не подтвердили исследования Е.Т. Трубникова [14], согласно которым критической нагрузкой при распределенном ударе является 5,5 кгс/м (53,9 Дж). Стоит отметить, что каска с нулевой амортизацией (практически не амортизирующая удар) предотвращает костные повреждения при таких воздействиях [4]. Повреждения костей при распределенном ударе (биоманекен в каске) наступают при ударе энергией 8,4–9 кгс/м (82,4–88,3 Дж) (в том числе при боковом ударе).

Повреждение шейных позвонков согласно исследованиям R.W. Webster [8] происходит при вертикальном ударе, эквивалентном статическому усилию 544 кгс (5–6 кН) [3]. А.П. Громовым было доказано большее повреждающее воздействие статических нагрузок по сравнению с динамическими. Было установлено, что «за счет амортизации позвоночника нагрузка в среднем снижается на 31 %» и повреждение шейного отдела позвоночника при этом не происходит. Таким образом, согласно [4] диапазон повреждения шейных позвонков составляет 4–8 кН [3].

Сотрясение головного мозга как критерий безопасности в полной мере А.П. Громовым не был исследован. Ученый выдвинул предположение, что «при рассредоточенном ударе сотрясение мозга наступает при ударе с большей энергией, чем при концентрированном» [4], в связи с этим была подвергнута сомнению предусмотренная [14] «абсолютно безопасная для человека в защитной каске» величина усилия 1,4 кгс/м. При оценке данного критерия А.П. Громов ссылается на работы вышеупомянутых Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли [7]. Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли установили «порог сотрясения головного мозга» или «относительно безопасного сотрясения головного мозга» при концентрированном ударе – 2,15 кгс/м (21,1 Дж). Следовательно, можно сделать вывод, что рассредоточенный удар такой энергии не вызовет сотрясение мозга. Однако имеются работы С.М. Harris и С. Crede, в которых авторы отмечают сотрясение головного мозга при ударе с энергией 23 Дж в большинстве случаев [3].

Проведение исследований в области биомеханики травмы позволили задать критерии безопасности (уровни защиты [3]) для персонала, выполняющего работы в СИЗ головы. Следует отметить, что в качестве «лимитирующих факторов» [3] приняты повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга.

На основании результатов исследований и литературных источников [7] в [6] было предложено, что «для защиты головы от падающих сверху предметов каска должна выдерживать нагрузку с энергией удара 8,6 кгс/м (84,3 Дж) (при 75 % амортизации), что соответствует ударной нагрузке шаром массой 4,78 кг, падающим с высоты 1,8 м». При этом передаваемое на голову усилие составляет 2,15 кгс/м (21,1 Дж), что соответствует критериям безопасности по лимитирующим факторам (повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга).

Таким образом, А.П. Громов с соавторами [6] рекомендовали ужесточить требования действующих на тот момент стандартов (устойчивость при ударе в 50 Дж, величина передаваемого на голову усилия – не более 5 кН) и изготавливать каски с большей ударостойкостью

и, соответственно, амортизирующей способностью. На этих рекомендациях базировались стандарты, устанавливающие требования к СИЗ головы различного назначения, действующие на территории стран СНГ.

В таблице 1 приведены основные требования, предъявляемые к механической прочности, амортизирующей способности, устойчивости к перфорации шлемов/каска пожарного в странах СНГ, Европе и США [15–18]. Наиболее строгие требования к амортизирующей способности устанавливает американский стандарт (передаваемое усилие не более 3,780 кН) [18]. Методы оценки передаваемого усилия в [15–18] имеют отличия.

Таблица 2. – Средства измерений

Показатель	ГОСТ 30694-2000	ГОСТ Р 53269-2019	EN 443:2008	NFPA 1971:2018
Удар тупым предметом (испытание на амортизацию)	125 Дж (передаваемое усилие ≤ 15 кН)	50 Дж (передаваемое усилие ≤ 5 кН)	123 Дж (передаваемое усилие ≤ 15 кН)	54 Дж (передаваемое усилие $\leq 3,780$ кН) 93 Дж (передаваемое ускорение: верх $\leq 150g$, перед/зад/стороны $\leq 300g$)
Удар тупым предметом (испытание на механическую прочность)	80 Дж	80 Дж	–	–
Удар острым предметом (испытание на перфорацию)	30 Дж	30 Дж	24,5 Дж (верх), 19,5 Дж (боковые поверхности)	24,5 Дж

Примечание. В таблице g – ускорение свободного падения (m/s^2).

Следует отметить, что при стандартизации зачастую требования к защитным свойствам СИЗ продиктованы их ведущими производителями, стремящимися к производству уникальной продукции с высокой степенью защиты, что особенно характерно для стран Европы. В свою очередь, требования [17] были учтены при разработке отечественного стандарта [15].

Устойчивость шлема/каска к указанным выше опасностям обеспечивается выбором материала корпуса и его конструктивного исполнения, а также материала внутренней оснастки и средств дополнительной амортизации. Согласно заключениям В.Е. Родина и В.В. Трумеля [3; 19] рациональными являются конструкции, в которых «применению жесткого, неупругого материала неизменно сопутствует слабовыпуклая форма купольной части корпуса, и, наоборот, при использовании термопластичных материалов, обладающих большой эластичностью, купол корпуса должен быть крутым». В первом случае рациональным является применение более эластичной внутренней оснастки (амортизатора), во втором – жесткой, т.к. значительную часть нагрузки будет поглощать купол шлема. В последние годы наблюдается тенденция к производству СИЗ головы с «реактивным» корпусом, высокими прочностными характеристиками. Такие конструктивные решения и подход к обеспечению безопасности ведут к увеличению жесткости корпуса и снижению амортизационных свойств шлемов/каска. В качестве компенсирующего мероприятия применяются дополнительные средства амортизации: амортизаторы и внутренние оболочки (для мотошлемов) из пенополистирола, пенополипропилена и подобных вспененных материалов. Амортизаторы применяются не только в промышленных, военных и пожарных, но и хоккейных, велосипедных, мотоциклетных шлемах/касках.

С развитием цифровых технологий стало возможным моделирование ударных воздействий без применения биоманекенов и реализации большого числа натуральных экспериментов. Применение конечно-элементных моделей позволило воспроизводить воздействия различной сложности, что на практике требует больших трудозатрат [20–26], и определять параметры и нагрузки, которые тяжело измерить в условиях реального эксперимента [20]. Изначально модели головы человека, применяемые при компьютерном моделировании, были значительно упрощены и представляли собой систему из нескольких тел с заданными свойствами, имитирующих основные ткани [20]. С течением времени модели дорабатывались с учетом анатомических особенностей и свойств тканей, применялись различные подходы к заданию границ между отдельными материалами. Наиболее современные модели основаны на данных компьютерной или магнитно-резонансной томографии [20]. Современные

имитационные модели ударных нагрузок на голову содержат следующие основные допущения:

- ткани рассматриваются как изотропные;
- в зависимости от типа проводимого эксперимента мозг человека (в отличие от других тканей, которые представляются как линейно-упругие) может быть определен как материал с линейно-упругим или линейно-вязкоупругим поведением [20];
- между мозгом и черепом имеются общая граница / отделены слоем спинномозговой жидкости с линейно-упругими свойствами / исключается взаимное движение / допускается скольжение.

Те или иные допущения принимаются в зависимости от решаемой при моделировании задачи. Однако неизменно то, что проведение натурального эксперимента является важным этапом проверки любой конечно-элементной модели, используемой для изучения травмы головы.

Накопленный к настоящему моменту экспериментальный материал и результаты моделирования [4; 20] позволяют с достаточной достоверностью определить вероятность травматизма. При этом могут использоваться различные критерии черепно-мозговой травмы. Наибольшее распространение получили критерии, вычисляемые на основе ускорения центра тяжести головы [20]: *HIC* (Head Injury Criterion), *GSI* (Gadd Severity Index), оценка максимального линейного и вращательного ускорения и др.

Значения напряжений, деформаций и внутричерепного давления применяются для оценки довольно редко.

Критерий *HIC* учитывает ускорение головы и его продолжительность. Данный критерий отображает вероятность возникновения травм головы в результате удара. *HIC* выводится из измерений акселерометра, установленного в центре макета головы, и определяется как:

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\},$$

где t_1 и t_2 – начальное и конечное время интервала, в течение которого *HIC* достигает максимального значения, с;

$a(t)$ – ускорение макета головы в момент времени t , измеряемое в ускорениях свободного падения g .

Временной интервал ограничен значениями от 3 до 36 мс, обычно принимается значение 15 мс [27]. Критерий *HIC* широко применяется для оценки степени тяжести травм при оценке безопасности СИЗ головы (в том числе спортивных), автомобильного транспорта. Для простоты анализа полученных в ходе экспериментальных исследований результатов применяется сокращенная шкала тяжести повреждений *AIS* (Abbreviated Injury Scale). В соответствии со шкалой *AIS* каждая травма классифицируется в зависимости от области тела, а также тяжести повреждений [28]. В таблице 2 приведено соотношение между шкалой *AIS*, критерием *HIC*, максимальным ускорением и тяжестью травмы.

Таблица 2. – Оценка степени тяжести повреждений головы по шкале *AIS* в соотношении с критерием *HIC* и максимальным ускорением

Шкала AIS	Оценка степени тяжести травмы	<i>HIC</i>	Максимальное ускорение
0	Нет травмы	134	50 g
1	Легкая (головная боль, головокружение)	135–519	50–100 g
2	Средняя (потеря сознания менее 1 ч)	520–899	100–150 g
3	Серьезная (потеря сознания 1–6 ч)	900–1254	150–200 g
4	Тяжелая (потеря сознания 6–24 ч)	1255–1574	200–250 g
5	Критическая (потеря сознания в течение более 25 ч, большая гематома)	1575–1859	250–300 g
–	Летальный исход	1860	–

Результаты моделирования, их сходимость с результатами натуральных наблюдений зависят от принимаемых в обоих случаях допущений, видов прилагаемых воздействий, времени их действия и других критериев. Российским ученым [20] удалось получить конечно-элементную модель головы, которая показала удовлетворительные результаты в сравнении

с экспериментальными исследованиями, что говорит о возможности ее применения в решении различных задач контактной биомеханики для случаев кратковременных ударных нагрузок. Ими было установлено, что при силе удара от 4000 до 6000 Н можно говорить о получении травмы средней и серьезной тяжести. Удары с силой более 7000 Н влекут тяжелые последствия с длительной потерей сознания, 10 000 Н – с большой вероятностью наступит смерть. Данные уточняются по мере создания современных трехмерных конечно-элементных моделей, совершенствования вычислительных алгоритмов и методов натуральных наблюдений.

Технологии моделирования все чаще используются при оценке прочностных свойств СИЗ головы, применяемых в промышленности, мотошлемов, спортивных касок [29; 30]. Научные работы в этой области посвящены изучению влияния параметров ударной нагрузки, количества наносимых ударов, конструктивных решений изделия и т.д. на его прочностные характеристики. В работе [31] представлена разработка конструктивных решений шлема пожарного с точки зрения «пользователь – продукт – окружающая среда», что в большей степени касается функциональности, эргономики и иных аспектов, не связанных с прочностными свойствами изделия. Особый интерес представляют исследования по оценке именно прочностных характеристик шлемов/касок пожарного [32–38].

Заключение

На основании проведенного анализа можно утверждать, что разработка требований к прочностным и амортизационным характеристикам средств индивидуальной защиты (СИЗ) головы опирается на углубленное понимание процессов травматизации черепа и головного мозга, сформированное в результате теоретических и экспериментальных биомеханических исследований. Установлено, что теоретические модели и биомеханические эксперименты позволили выделить три ключевых типа опасности при травмах головы и их критические значения. Полученные научные данные позволили обосновать параметры безопасности и сформировать стандарты, обеспечивающие эффективную защиту от механических повреждений. Наряду с зарубежными исследователями значительный вклад в изучение биомеханики травмы, а также в формирование нормативных требований к уровню защиты от механических повреждений СИЗ головы на территории постсоветского пространства внес А.П. Громов с соавторами (Н.П. Пырлин, В.И. Потапов и др.). В ходе анализа также определена зависимость уровня основных защитных свойств касок/шлемов от материала, применяемого для изготовления корпуса, а также от конструктивного исполнения корпуса и внутренней оснастки, наличия средств дополнительной амортизации. Выявлено, что использование современных технологий в сфере биомеханики травмы и оценки эффективности СИЗ головы позволяет широко оценить процессы, происходящие при ударных воздействиях в макете головы и средстве защиты, что, в свою очередь, дает возможность обеспечить научный подход к их разработке, тщательно продумать конструкцию и эргономику.

Следовательно, проведение с применением современных технологий исследований в области комплексной оценки влияния конструктивных параметров касок пожарных (геометрия корпуса, применяемые материалы, конфигурация внутренней оснастки) на их прочностные характеристики позволит обосновать оптимальные инженерные решения, направленные на повышение их уровня защиты и функциональной надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Accidents at work statistics // Eurostat: official website of the European Union. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics (date of access: 18.09.2025).
2. Campbell, R. Firefighter injuries on the fireground / R. Campbell // National Fire Protection Association (NFPA), August, 2024. – 15 p. – URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/patterns-of-firefighter-fireground-injuries> (date of access: 18.09.2025).
3. Родин, В.Е. Научно-технические основы разработки средств индивидуальной защиты человека от основных видов производственного травматизма: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Родин Владимир Ефимович; Екатеринбург. науч.-исслед. ин-т охраны труда. – Екатеринбург, 1999. – 395 л.
4. Громов, А.П. Биомеханика травмы: повреждения головы, позвоночника и грудной клетки / А.П. Громов. – М.: Медицина, 1979. – 271 с.
5. Громов, А.П. Новый метод измерения силы удара в судебной травматологии / А.П. Громов, Б.А. Прудковский, О.А. Ромодановский [и др.] // Судебно-медицинская экспертиза. – 1971. – Т. 14, № 2. – С. 8–10.

6. Громов, А.П. Исследование повреждений костей черепа в эксперименте при дозированных ударах / А.П. Громов, И.И. Антуфьев, О.Ф. Салтыкова [и др.] // Судебно-медицинская экспертиза. – 1967. – Т. 10, № 3. – С. 14–20.
7. Фон-Гирке, Х.Е. Ударные ускорения / Х.Е. Фон-Гирке, Дж.В. Бринкли // Основы космической биологии и медицины: совмест. совет.-амер. изд. в 3 т. / Акад. наук СССР, Нац. упр. по авиации и исслед. косм. пространства США; под общ. ред. О. Г. Газенко, М. Кальвина. – М.: Наука, 1975. – Т. 2, кн. 1: Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. – С. 232–264.
8. Industrial protective helmets for electrical workers, class B: ANSI Z89.2-1971 (American National Standard Safety Requirements). – Approved April 14, 1971. – New York: American National Standards Institute, 1971. – 15 p. – URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/ansi.z89.2.1971.pdf> (date of access: 18.09.2025).
9. Proctor, T.D. A review of research relating to industrial helmet design / T.D. Proctor // Journal of Occupational Accidents. – 1982. – Vol. 3, No. 4. – P. 259–272. – DOI: 10.1016/0376-6349(82)90003-7.
10. Mayer, A. Casques de protection pour l'industrie-Bilan des essais. Critères de choix pour l'utilisateur / A. Mayer, S. Salsi // Cahiers de notes documentaires – 1977. – Vol. 87, No. 2. – P. 159–185.
11. Development of standards for industrial and firefighters head protective devices: final rep. / A.A. Scalane // National Technical Reports Library. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB225163.xhtml#> (date of access: 18.09.2025).
12. Корсаков, С.А. Биомеханика ударного взаимодействия травмирующего предмета и человека / С.А. Корсаков // Медицинская экспертиза и право. – 2012. – № 3. – С. 10–12. – EDN: PBUNGJ.
13. Недугов, Г.В. Определение и экспертная оценка силы удара / Г.В. Недугов, В.В. Недугова // Проблемы экспертизы в медицине. – 2012. – Т. 12, № 1-2. – С. 14–17. – EDN: PCLAKB.
14. Трубников, Е.Г. Исследование и совершенствование средств индивидуальной защиты головы горнорабочего от травм: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.03.01 / Трубников Евгений Григорьевич; Ленинградский горный институт. – Л., 1972. – 22 с.
15. Техника пожарная. Шлем пожарного. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 30694-2000. – Введ. 01.09.2002. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 48 с.
16. Техника пожарная. Каски пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 53269-2019. – Введ. 19.09.2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.
17. Helmets for fire fighting in buildings and other structures: EN 443:2008. – Impl. 01.06.2008. – Brussels: European Committee for Standardization, 2008. – 40 p.
18. Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting: NFPA 1971:2018. – Impl. 05.12.2012. – National Fire Protection Association (NFPA), 2018.
19. Трумель, В.В. Совершенствование и разработка средств индивидуальной защиты головы для работников горной промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Трумель Виталий Владимирович; Моск. гос. горный ун-т. – М., 2003. – 15 с.
20. Караваев, А.С. Математическое моделирование ударного воздействия на голову при черепно-мозговых травмах / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 178–195. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.04. – EDN: YLXLLV.
21. Агапов, П.И. Численное моделирование последствий механического воздействия на мозг человека при черепно-мозговой травме / П.И. Агапов, О.М. Белоцерковский, И.Б. Петров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т. 46, № 9. – С. 1711–1720. – EDN: HUZTFN.
22. Белошицкий, В.В. Принципы моделирования черепно-мозговой травмы в эксперименте / В.В. Белошицкий // Український нейрохірургічний журнал. – 2008. – № 4. – С. 9–15. – DOI: 10.25305/unj.108232. – EDN: PXRWVB.
23. Васюков, А.В. Моделирование механических факторов черепно-мозговых травм сеточно-характеристическим численным методом / А.В. Васюков, И.Б. Петров // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. – 2010. – № 10. – С. 42–50. – EDN: MWCBPН.
24. Караваев, А.С. Метод построения неструктурированных шестигранных сеток из объемных данных / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 11–24. – DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-1-11-24. – EDN: QYUQPN.
25. Караваев, А.С. Метод Шварца декомпозиции области в контактных задачах / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Проблемы механики и материаловедения: труды Института механики УрО РАН. – Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2017. – С. 6–20. – EDN: ZFJXXN.

26. Караваев, А.С. Построение биомеханических конечно-элементных моделей / А.С. Караваев, С.П. Копысов, И.М. Кузьмин // Проблемы механики и материаловедения: труды Института механики УрО РАН. – Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2016. – С. 7–13. – EDN: WEKXWD.
27. Henn, H-W. Crash tests and the head injury criterion / H-W. Henn // Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA. – 1998. – Vol. 17, № 4. – P. 162–170. – DOI: 10.1093/teamat/17.4.162.
28. Дятлов, М.М. Системы определения степени тяжести политравмы и концепции хирургической помощи при ней. Часть 1. Системы и концепции, разработанные на Западе (обзор литературы) / М.М. Дятлов // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – № 2. – С. 7–17. – DOI: 10.51523/2708-6011.2006-3-2-1. – EDN: YUFQQD.
29. Wu, J.Z. Evaluation of the shock absorption performance of construction helmets under repeated top impacts / J.Z. Wu, C.S. Pan, B.M. Wimer // Engineering Failure Analysis. – 2018. – Vol. 96. – P. 330–339. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.015.
30. Caserta, G.D. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner / G.D. Caserta, L. Iannucci, U. Galvanetto // Composite Structures. – 2011. – Vol. 93, No. 11. – P. 2748–2759. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.05.029.
31. Fangting Xu. Research on the product design of firefighting helmet based on design scenario / Fangting Xu, Kang Hu // Proceedings of the 2nd International Conference on Management, Education and Social Science (ICMESS 2018) / Advances in Social Science, Education and Humanities Research, Vol. 176. – Atlantis Press, 2018. – P. 602–606. – DOI: 10.2991/icmess-18.2018.133.
32. Шумай, С.М. Разработка, научное обоснование параметров и результаты испытаний перспективной модели шлема пожарного-спасателя / С.М. Шумай, В.В. Воронович, С.П. Асташов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 2 (44). – С. 113–120. – EDN: MCNEBG.
33. Старовойтов, А.А. Разработка и внедрение в органы и подразделения МЧС Республики Беларусь облегченной модели шлема спасателя-пожарного / А.А. Старовойтов, С.М. Малашенко, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2021. – № 2 (50). – С. 164–170. – DOI: 10.54422/1994-439X.2021.2-50.164-170. – EDN: VGRMED.
34. Шумай, С.М. Анализ технических нормативно-правовых актов, устанавливающих требования к шлемам пожарного / С.М. Шумай, Ю.С. Иванов, В.В. Кашанкова, С.М. Малашенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 1 нояб. 2016 г.: в 2 ч. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 398–409.
35. Старовойтов, А.А. Разработка облегченной модели шлема спасателя-пожарного / А.А. Старовойтов, С.М. Малашенко, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 30 сент. 2021 г. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – С. 175–178.
36. Иванов, Ю.С. Результаты испытаний шлемов пожарного отечественного и зарубежного производства / Ю.С. Иванов, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 30 сент. 2021 г. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – С. 141–144.
37. Иванов, Ю.С. Методы численного моделирования при разработке шлема спасателя-пожарного / Ю.С. Иванов, Т.М. Мартыненко, В.В. Кашанкова // Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. материалов VIII Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Минск, 27 мая 2022 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Респ. Беларусь. – Минск: УГЗ, 2022. – С. 75–77.
38. Impact of the development of the design of firefighter helmets on the mechanical shock absorption capacity / A. Walczak, D. Pieniak, P. Lonkwick [et al.] // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2023. – Vol. 17, № 6. – P. 171–184. – DOI: 10.12913/22998624/171753.

**Аналитический обзор исследований основных защитных свойств
средств индивидуальной защиты головы**

**Analytical review of research on the main protective properties
of personal head protective equipment**

Иванов Юрий Сергеевич

кандидат технических наук
Республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт
метрологии», заместитель директора
Адрес: Старовиленский тракт, 93,
220053, г. Минск, Беларусь
Email: ivanou@belgim.by
SPIN-код: 5895-6967

Yuriy S. Ivanov

PhD in Medical Sciences
Republican Unitary Enterprise
«Belarusian State Institute of Metrology»,
Deputy Director
Address: Starovilenskiy tract, 93,
220053, Minsk, Belarus
Email: ivanou@belgim.by
ORCID: 0000-0002-6548-9922

Кашанкова Вероника Владимировна

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, отдел исследований аварийно-
спасательной техники и оборудования,
ведущий научный сотрудник
Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь
Email: v.nechaeva@list.ru
SPIN-код: 4319-7426

Veronika V. Kashankova

Institution «Scientific and Research Institute
of Fire Safety and Emergency Situations»
of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus, Emergency Rescue
Technique and Equipment Research Department,
Leading Researcher
Address: Zhandeldina str., 24,
010000, Astana, Kazakhstan
Email: v.nechaeva@list.ru
ORCID: 0009-0001-1430-000X

ANALYTICAL REVIEW OF RESEARCH ON THE MAIN PROTECTIVE PROPERTIES OF PERSONAL HEAD PROTECTIVE EQUIPMENT

Ivanov Yu.S., Kashankova V.V.

Purpose. Justification of the level of protective properties and design of the domestic firefighter-rescuer helmet.

Methods. Methods of theoretical knowledge: analysis, synthesis, induction and generalization.

Findings. An analysis of studies examining the fundamental protective properties of personal protective equipment (PPE) for the head has identified the main hazards associated with head injuries, their critical values, and the factors influencing the strength properties and design of helmet shells. Promising research methods in the design and development of PPE for the head have been identified.

Application field of research. Development of modern domestic PPE.

Keywords: personal head protection equipment, head injury, helmet/casque, protective properties.

(The date of submitting: September 19, 2025)

REFERENCES

1. *Accidents at work statistics.* Eurostat: official website of the European Union. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics (accessed: September 18, 2025).
2. Campbell R. *Firefighter injuries on the fireground.* National Fire Protection Association (NFPA), August, 2024. 15 p. URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/patterns-of-firefighter-fireground-injuries> (accessed: September 18, 2025).
3. Rodin V.E. *Nauchno-tekhnicheskie osnovy razrabotki sredstv individual'noy zashchity cheloveka ot osnovnykh vidov proizvodstvennogo travmatizma* [Scientific and technical foundations for the development of personal protective equipment for humans against the main types of industrial injuries]: Grand PhD tech. sci. diss.: 05.26.01; Yekaterinburg Scientific Research Institute of Occupational Safety. Yekaterinburg, 1999. 395 p. (rus)
4. Gromov A.P. *Biomekhanika travmy: povrezhdeniya golovy, pozvonochnika i grudnoy kletki* [Biomechanics of injury: injuries to the head, spine and chest]. Moscow: Meditsina, 1979. 271 p. (rus)
5. Gromov A.P., Prudkovskiy B.A., Romodanovskiy O.A., Shcherbin L.A., Petrov V.A., Savostin G.A. *Novyy metod izmereniya sily udara v sudebnoy travmatologii* [A new method for measuring impact force in forensic traumatology]. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*, 1971. Vol. 14, No. 2. Pp. 8–10. (rus)
6. Gromov A.P., Antuf'ev I.I., Saltykova O.F., Skrypnik V.G., Boytsov V.M., Bolonkin G.S., Lomasov V.B., Maslov A.V., Veremkovitch N.A., Krasnyh I.G. *Issledovanie povrezhdeniy kostey cherepa v eksperimente pri dozirovannykh udarakh* [An experimental study of cranial injuries caused by dosated]. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*, 1967. Vol. 10, No. 3. Pp. 14–20. (rus)
7. von Gierke H.E., Brinkley J.W. *Impact accelerations.* In *Fundations of space biology and medicine: joint USA/USSR publication in 3 vol.* National Aeronautics and Space Administration of the USA, Academy of Sciences of the USSR; general editors: M. Calvin, O.G. Gazenko. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1975. Vol. 2, book 1: *Ecological and physiological foundations of space biology and medicine.* Pp. 214–246.
8. *Industrial protective helmets for electrical workers, class B: ANSI Z89.2-1971* (American National Standard Safety Requirements). Approved April 14, 1971. New York: American National Standards Institute, 1971. 15 p. URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/ansi.z89.2.1971.pdf> (accessed: September 18, 2025).
9. Proctor T.D. *A review of research relating to industrial helmet design.* *Journal of Occupational Accidents*, 1982. Vol. 3, No. 4. Pp. 259–272. DOI: 10.1016/0376-6349(82)90003-7.
10. Mayer A., Salsi S. *Casques de protection pour l'industrie-Bilan des essais. Critères de choix pour l'utilisateur / A. Mayer// Cahiers de notes documentaires – 1977. – Vol. 87, No. 2. – Pp. 159–185.* (fra)
11. Scalane A.A. *Development of standards for industrial and firefighters head protective devices: final rep.* National Technical Reports Library. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB225163.xhtml#> (accessed: September 18, 2025).
12. Korsakov S.A. *Biomekhanika udarnogo vzaimodeystviya travmiruyushchego predmeta i cheloveka* [Biomechanics of impact interaction between a traumatic object and a person]. *Meditsinskaya ekspertiza i parvo*, 2012. No. 3. Pp. 10–12. (rus). EDN: PBUNJ.

13. Nedugov G.V., Nedugova V.V. Opredelenie i ekspertnaya otsenka sily udara [Determination and expert assessment of impact force]. *Medical Examination Problem*, 2012. Vol. 12, No. 1-2. Pp. 14–17. (rus). EDN: PCLAKB.
14. Trubnikov E.G. Issledovanie i sovershenstvovanie sredstv individual'noy zashchity golovy gornorabochego ot travm [Research and improvement of personal protective equipment for the miner's head from injury]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 03.03.01; Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1972. 22 p. (rus)
15. *Tekhnika pozharnaya. Shlem pozharnogo. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Fire-fighting equipment. Firefighter's helmet. General technical requirements and test methods]: GOST 30694-2000. Introduced on September 1, 2002. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2002. 48 p. (rus)
16. *Tekhnika pozharnaya. Kaski pozharnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire fighting equipment. Firemen's helmets. General technical requirements. Test methods]: GOST R 53269-2019. Introduced on September 19, 2022. Moscow: Standartinform, 2019. 24 p. (rus)
17. *Helmets for fire fighting in buildings and other structures*: EN 443:2008. Impl. 01.06.2008. Brussels: European Committee for Standardization, 2008. 40 p.
18. *Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting*: NFPA 1971:2018. Impl. 05.12.2012. National Fire Protection Association (NFPA), 2018.
19. Trumel' V.V. *Sovershenstvovanie i razrabotka sredstv individual'noy zashchity golovy dlya rabotnikov gornoj promyshlennosti* [Improvement and development of personal head protection equipment for mining workers]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.26.01; Moscow State Mining University. Moscow, 2003. 15 p. (rus)
20. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Matematicheskoe modelirovanie udarnogo vozdeystviya na golovu pri cherepno-mozgovykh travmakh [Mathematical modelling of head impact with craniocerebral injury]. *Russian Journal of Biomechanics*, 2018. Vol. 22, No. 2. Pp. 178–195. (rus). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.04. EDN: YLXLLV.
21. Agapov P.I., Belotserkovskii O.M., Petrov I.B. Numerical simulation of the consequences of a mechanical action on a human brain under a skull injury. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2006. Vol. 46, No. 9. Pp. 1629–1638. DOI: 10.1134/S0965542506090144. EDN: LKCHIL.
22. Beloshitskiy V.V. Printsipy modelirovaniya cherepno-mozgovoy travmy v eksperimente [The principles of experimental traumatic brain injury modelling]. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 2008. No. 4. Pp. 9–15. (rus). DOI: 10.25305/unj.108232. EDN: PXRWVB.
23. Vasyukov A.V., Petrov I.B. Modelirovanie mekhanicheskikh faktorov cherepno-mozgovykh travm setochno-kharakteristicheskim chislennym metodom [Numerical modelling of mechanical factors of cranial-cerebral injury using grid-characteristic method]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta*, 2010. No. 10. Pp. 42–51. (rus). EDN: MWCBPH.
24. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Metod postroeniya nestrukturirovannykh shestigrannykh setok iz ob'emnykh dannykh [The method of unstructured hexahedral mesh generation from volumetric data]. *Computer Research and Modeling*, 2013. Vol. 5, No. 1. Pp. 11–24. (rus). DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-1-11-24. EDN: QYUQPN.
25. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Metod Shvartsa dekompozitsii oblasti v kontaktnykh zadachakh [Schwartz's method of domain decomposition in contact problems]. *Problemy mekhaniki i materialovedeniya* [Problems of mechanics and materials science]: *Proc. of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. Izhevsk, 2017. Pp. 6–20. (rus). EDN: ZFJJXN.
26. Karavaev A.S., Kopysov S.P., Kuz'min I.M. Postroenie biomekhanicheskikh konechno-elementnykh modeley [Construction of biomechanical finite element models]. *Problemy mekhaniki i materialovedeniya* [Problems of mechanics and materials science]: *Proc. of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. Izhevsk, 2016. Pp. 7–13. (rus). EDN: WEKXWD.
27. Henn, H-W. Crash tests and the head injury criterion. *Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA*, 1998. Vol. 17, No. 4. Pp. 162–170. DOI: 10.1093/teamat/17.4.162.
28. Dyatlov M.M. Sistemy opredeleniya stepeni tyazhesti politravmy i kontseptsii khirurgicheskoy pomoshchi pri ney. Chast' 1. Sistemy i kontseptsii, razrabotannye na Zapade (obzor literatury) [Detection of polytrauma severity degree and surgical assistance concept Part I. Systems and concepts developed in the West (references review)]. *Health and Ecology Issues*, 2006. No. 2. Pp. 7–17. (rus). DOI: 10.51523/2708-6011.2006-3-2-1. EDN: YUFQQD.
29. Wu J.Z., Pan C.S., Wimer B.M. Evaluation of the shock absorption performance of construction helmets under repeated top impacts. *Engineering Failure Analysis*, 2018. Vol. 96. Pp. 330–339. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.015.

30. Caserta G.D., Iannucci L., Galvanetto U. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Composite Structures*, 2011. Vol. 93, No. 11. Pp. 2748–2759. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.05.029.
31. Fangting Xu, Kang Hu. Research on the product design of firefighting helmet based on design scenario. *Proc. of the 2nd International Conference on Management, Education and Social Science (ICMESS 2018)*. In the series «Advances in Social Science, Education and Humanities Research» (vol. 176). Atlantis Press, 2018. Pp. 602–606. DOI: 10.2991/icmess-18.2018.133.
32. Shumay S.M., Voronovich V.V., Astashov S.P., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka, nauchnoe obosnovanie parametrov i rezul'taty ispytaniy perspektivnoy modeli shlema pozharnogo-spasatelya [Development, scientific substantiation of parameters and test results of a promising model of a firefighter-rescuer helmet]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2018. No. 2 (44). Pp. 113–120. (rus). EDN: MCNEBG.
33. Starovoytov A.A., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka i vnedrenie v organy i podrazdeleniya MChS Respubliki Belarus' oblegchennoy modeli shlema spasatelya-pozharnogo [Development of a lightweight firefighter helmet model and implementation of it in the departments of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2021. No. 2 (50). Pp. 164–170. (rus). DOI: 10.54422/1994-439X.2021.2-50.164-170. EDN: VGRMED.
34. Shumay S.M., Ivanov Yu.S., Kashankova V.V., Malashenko S.M. Analiz tekhnicheskikh normativno-pravovykh aktov, ustanavlivayushchikh trebovaniya k shlemam pozharnogo [Analysis of technical regulations establishing requirements for firefighter helmets]. *Proc. of VII Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 60th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, November 1, 2016. In 2 parts. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2016. Part 2. Pp. 398–409. (rus)
35. Starovoytov A.A., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka oblegchennoy modeli shlema spasatelya-pozharnogo [Development of a lightweight model of a rescue firefighter helmet]. *Proc. of IX Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 65th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, September 30, 2021. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2021. Pp. 175–178.
36. Ivanov Yu.S., Kashankova V.V. Rezul'taty ispytaniy shlemov pozharnogo otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva [Test results of firefighter helmets of domestic and foreign production]. *Proc. of IX Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 65th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, September 30, 2021. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2021. Pp. 141–144.
37. Ivanov Yu.S., Martynenko T.M., Kashankova V.V. Metody chislennogo modelirovaniya pri razrabotke shlema spasatelya-pozharnogo [Numerical modeling methods in the development of a rescue firefighter helmet]. *Proc. of VIII Intern. correspondence scientific-practical conf. «Tekhnologii likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy»*, Minsk, May 27, 2022. Minsk: University of Civil Protection, 2022. Pp. 75–77.
38. Walczak A., Pieniak D., Lonkwic P., Kupicz W., Ptak S., Piątek P., Wąsik W., Renkas A. Impact of the development of the design of firefighter helmets on the mechanical shock absorption capacity. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2023. Vol. 17, No. 6. Pp. 171–184. DOI: 10.12913/22998624/171753.

Copyright © 2025 Ivanov Yu.S., Kashankova V.V.

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

ПРИОРИТИЗАЦИЯ МЕР СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ ВКЛАДА СЦЕНАРИЕВ В ОБЩУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Крецу Р.М., Рыбаков А.В.

Цель. Разработка количественной меры вклада сценариев чрезвычайных ситуаций (ЧС) в общую неопределенность риска техногенных ЧС на объектах топливно-энергетического комплекса, основанной на энтропии системы, информационной значимости отдельных сценариев и степени результативности защитных мер. Это позволит учитывать сценарии с малой вероятностью, но высоким информационным весом, и обеспечит рациональный выбор мер в условиях ограниченного бюджета.

Методы. В качестве основного метода используется информационно-энтропийный подход, позволяющий количественно оценить вклад каждого сценария чрезвычайной ситуации в общую неопределенность системы. Построена оптимизационная модель выбора защитных мер с учетом их результативности, стоимости и информационной значимости сценариев. Проведен численный эксперимент для оценки эффективности предложенного подхода в условиях ограниченного бюджета и множественных рисков.

Результаты. Результаты исследования показали, что использование информационной значимости сценариев позволяет формировать более эффективные стратегии распределения ресурсов. Предложенная модель обеспечивает снижение остаточного риска при меньших затратах по сравнению с классическими подходами. Численный эксперимент подтвердил применимость метода для обоснованного выбора защитных мер в условиях высокой неопределенности и ограниченного бюджета на предотвращение техногенных ЧС.

Область применения исследований. Разработанная модель может применяться в системах управления рисками на промышленных и инфраструктурных объектах, подверженных техногенным чрезвычайным ситуациям. Подход актуален для проектирования планов мероприятий гражданской защиты, обоснования инвестиций в безопасность, а также при разработке цифровых платформ поддержки решений в условиях ограниченных ресурсов и высокой неопределенности.

Ключевые слова: безопасность, чрезвычайные ситуации, риск-менеджмент, энтропийный анализ, оценка рисков, техногенные катастрофы, анализ неопределенности, предупреждение аварий.

(Поступила в редакцию 15 июля 2025 г.)

Введение

Управление рисками чрезвычайных ситуаций техногенного характера на опасных производственных объектах остается одной из ключевых задач обеспечения как национальной безопасности, так и устойчивого функционирования на уровне управления промышленными объектами. Особенно это актуально для объектов нефтегазового комплекса России, где даже единичная авария может вызвать тяжелые техногенные и экологические последствия, несмотря на принятые меры защиты.

Анализ статистики аварий на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) за период 2014–2023 гг., проведенный в исследовании [1], выявил противоречивую динамику: при снижении числа аварий с 23 до 9 в год (рис. 1) величина совокупного ущерба остается нестабильной, с пиковым значением 5,3 млрд рублей в 2020 г. При этом ежегодный объем инвестиций в защитные меры и мероприятия колебался в пределах 9,5–10,3 млн рублей, оставаясь практически неизменным.

Сопоставление ущерба и инвестиций в безопасность (рис. 2) показывает, что в среднем за период 2014–2023 гг. на 1 рубль вложений приходилось более 170 руб. ущерба, при этом в ряде лет показатель превышал 300 руб., что свидетельствует об ограниченной результативности текущих стратегий защиты.

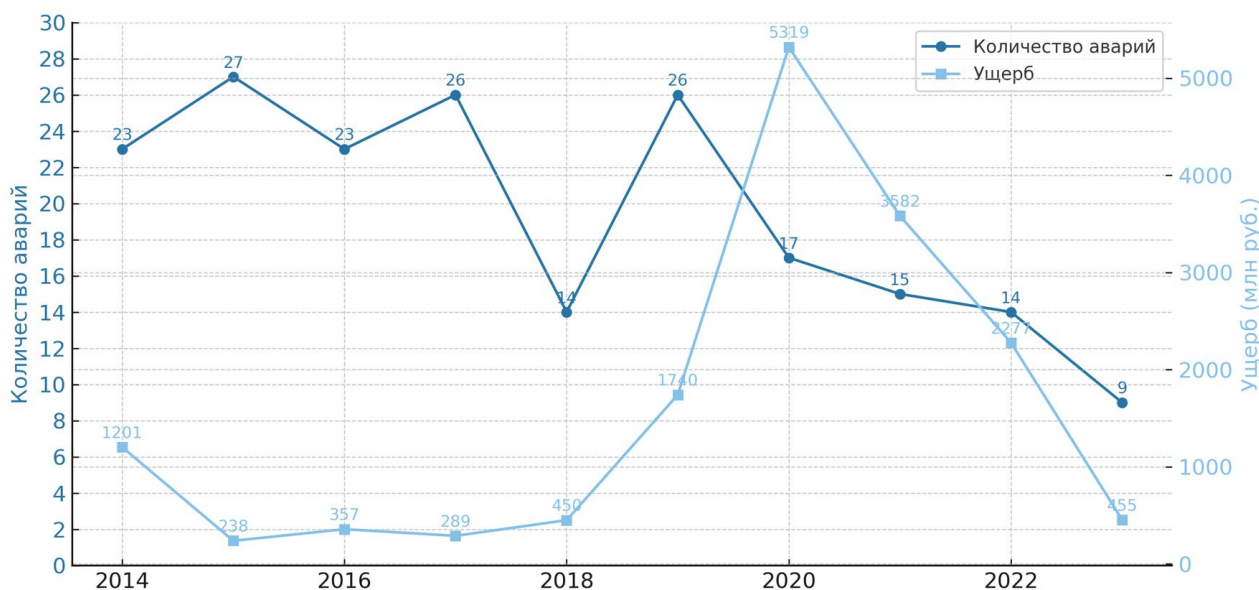


Рисунок 1. – Динамика аварий и ущерба на НПЗ России

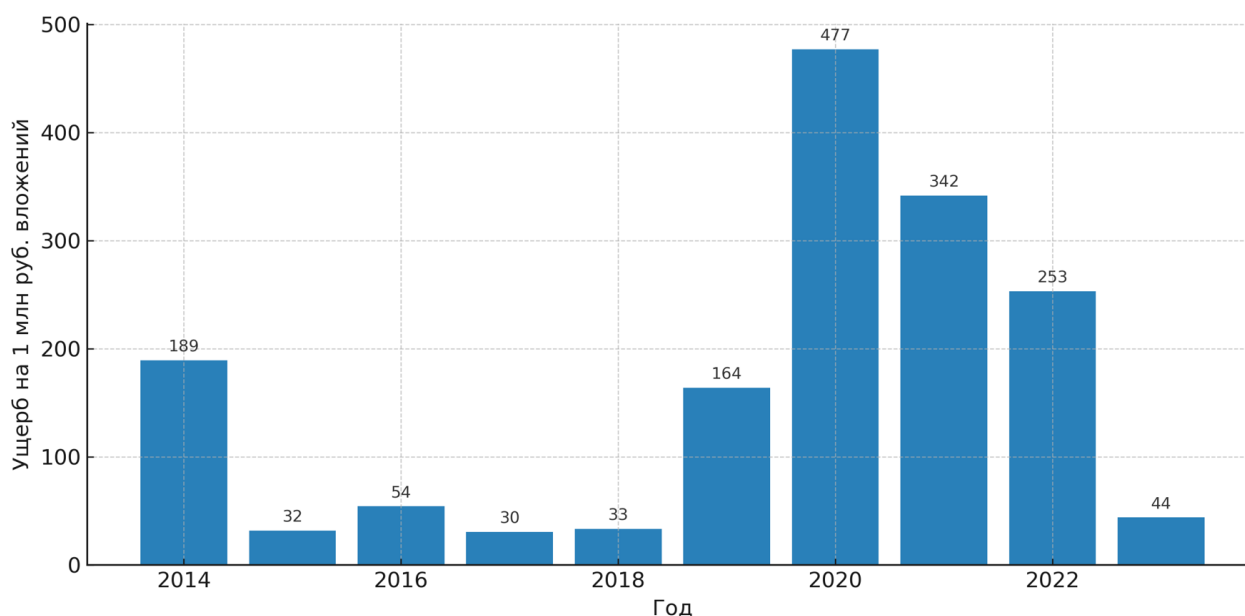


Рисунок 2. – Соотношение ущерба и инвестиций в обеспечение безопасности от ЧС

Несоответствие между вложениями и достигнутым уровнем защищенности свидетельствует о неэффективности универсальных подходов к выбору защитных мер, опирающихся на ретроспективную статистику и усредненные показатели. В реальности часть сценариев чрезвычайных ситуаций техногенного характера (далее – сценарии ЧС) остается недооцененной, несмотря на их потенциальную опасность. Это особенно характерно для редких, но информационно значимых сценариев ЧС, которые могут существенно повлиять на поведение системы в условиях неопределенности [2].

Современные исследования показывают, что ущерб от чрезвычайных ситуаций часто распределен по принципу fat-tail – *тяжелого хвоста*, где малочастотные, но высокоразрушительные события играют ключевую роль в совокупном риске. Это означает, что классические модели, ориентированные на средние значения, могут не учитывать критические сценарии ЧС. Так, в работе [3] показано, что ущерб от природных катастроф, включая пожары и промышленные взрывы, подчиняется степенному распределению с экспонентой около 1,5, а следовательно, имеет неограниченную дисперсию.

В классических статистических моделях, основанных на нормальном (гауссовом) распределении, большинство событий сосредоточены вокруг среднего значения, а вероятность отклонений резко падает. Такие распределения называют *тонкохвостыми* (thin-tail). Однако

в реальности – особенно в области чрезвычайных ситуаций – наблюдаются fat-tail распределения, в которых вероятность крайне разрушительных, редких событий существенно выше, чем предсказывает нормальное распределение. Как отмечает Дэвид Салазар¹, основное отличие такого распределения в том, что его дисперсия либо бесконечна, либо крайне нестабильна, что делает невозможным применение обычных метрик, таких как стандартное отклонение, для реального анализа риска.



Рисунок 3. – Наглядное сравнение нормальных и fat-tail распределений²

Например, при наличии тяжелого хвоста даже небольшая выборка данных может быть доминирована одним экстремальным значением (например, крупной аварией или катастрофой), которое будет определять всю структуру распределения. Это противоречит интуитивному понятию предсказуемости и требует принципиально иных методов – таких как энтропийный анализ, оценка информационной значимости сценариев ЧС и fat-tail устойчивые критерии приоритизации защитных мер.

Сходные выводы представлены и в недавнем исследовании, посвященном инцидентам на атомных станциях [4], где масштаб аварий имеет ярко выраженное fat-tail поведение. Даже единичные аварии способны вызвать цепные последствия, охватывающие всю сеть производства и снабжения. Кроме того, в работе [5] подчеркивается, что при наличии fat-tail любая традиционная система оценки эффективности затрат (СВА) становится неприменимой, т.к. ожидаемый ущерб стремится к бесконечности.

Подобные fat-tail паттерны характерны для техногенных аварий. Недавние исследования показывают, что несмотря на редкость таких событий, именно они формируют *тяжелый хвост* потерь, который традиционные методы недооценивают. Особенно это важно для систем, где:

- данные ограничены,
- ЧС случаются редко,
- но последствия катастрофичны.

Следствием является ситуация, когда частые, но слабые события вытесняют внимание и ресурсы, в то время как «редкие, но опасные» сценарии ЧС остаются недооцененными – несмотря на их высокий вклад в системную неопределенность. В такой ситуации просто увеличить бюджет недостаточно – необходимо перейти к методам, которые позволяют учитывать вклад сценариев ЧС в неопределенность системы и рационально распределять ресурсы в ее пользу.

В связи этим становится актуальным переход к методам, ориентированным не только на частотную вероятность и ущерб, но и на структуру неопределенности [6; 7] в системе оценки и управления риском ЧС техногенного характера. Использование информационно-энтропийного подхода позволяет формализовать вклад каждого сценария ЧС в общую энтропию и на этой основе приоритизировать защитные меры с учетом их реального влияния на устойчивость объекта. Кроме того, практическое подтверждение обоснованности такого подхода дают данные о техногенных авариях, произошедших в 2023 г. на промышленных

¹ Salazar, D. Standard deviation and fat tails / D. Salazar. – 2020. – URL: <https://david-salazar.github.io/posts/fat-vs-thin-tails/2020-05-13-standard-deviation-and-fat-tails.html> (date of access: 06.06.2025).

² См. сноску 1.

объектах, опубликованные Ростехнадзором³. Анализ показал, что две аварии – на объектах АО «Ачимгаз» и ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» – обеспечили более 70 % совокупного ущерба, несмотря на их единичный характер: общий ущерб от 21 аварии за 2023 г. составил около 800 млн рублей, при этом две аварии на объектах АО «Ачимгаз» (305 млн руб.) и ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» (290 млн руб.) доминировали в структуре ущерба, значительно превосходя остальные. Подобная структура ущерба иллюстрирует необходимость применения специфических методов оценки и управления рисками, которые учитывают влияние редких, но катастрофических событий. Это подчеркивает, что значительная часть остаточного риска формируется за счет небольшого числа редких, но крайне разрушительных сценариев ЧС, и именно они должны становиться фокусом приоритизации в рамках стратегии управления рисками чрезвычайных ситуаций на уровне производственного объекта при ограниченных ресурсах. Такая концентрация ущерба при редких событиях подтверждает наличие *тяжелого хвоста* распределения потерь, что обосновывает использование fat-tail модели для анализа техногенных рисков нефтеперерабатывающих предприятий.

На рисунке 4⁴ показано распределение ущерба от аварий в логарифмическом масштабе. Характерная линия на графике подтверждает наличие fat-tail распределения, что подчеркивает невозможность эффективного управления рисками только на основе средних значений.

Данный график отражает логарифмически ранжированное распределение ущерба от техногенных аварий за 2023 г. По оси X представлен ранг аварии (от наиболее разрушительной к наименее), по оси Y – величина ущерба в логарифмическом масштабе. В логарифмическом масштабе зависимость демонстрирует участок излома, отражающий переход от области частых малых событий к редким крупным. Этот участок характерен для систем с *тяжелым хвостом* (fat-tail), что подтверждает наличие асимметрии в распределении ущерба при техногенных рисках.

На практике это означает, что большинство аварий имели сравнительно незначительные экономические последствия, в то время как единичные события обеспечили непропорционально высокий ущерб. Такая форма распределения характерна для fat-tail (*тяжелых хвостов*) распределений, где вероятность крайне разрушительных событий существенно выше, чем предсказывают гауссовские модели.

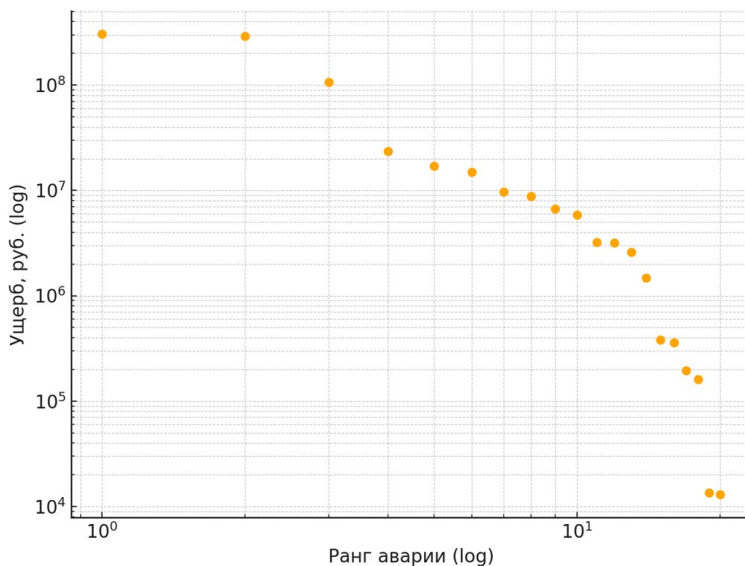


Рисунок 4. – Распределение ущерба от аварий за 2023 г. (логарифмический масштаб)

С точки зрения авторов, наличие *тяжелых хвостов* указывает на необходимость моделирования рисков не только по вероятности их наступления, но и по потенциалу ущерба, усиливая значимость информационно-энтропийного анализа и оценки остаточного риска в стратегическом управлении рисками ЧС производственного объекта.

³ Уроки, извлеченные из аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтедобывающей отраслей // Ростехнадзор: [сайт]. – URL: <https://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 29.03.2025).

⁴ Из 21 аварии, зафиксированной в 2023 г., 20 событий имели зарегистрированный ущерб, используемый для построения логарифмического и кумулятивного распределений. Одна авария с нулевым ущербом (по данным Ростехнадзора) была исключена из графиков ввиду невозможности логарифмического отображения значения.

На рисунке 5 отображен кумулятивный процент ущерба, из которого явно следует, что лишь несколько событий формируют подавляющую часть экономического ущерба.

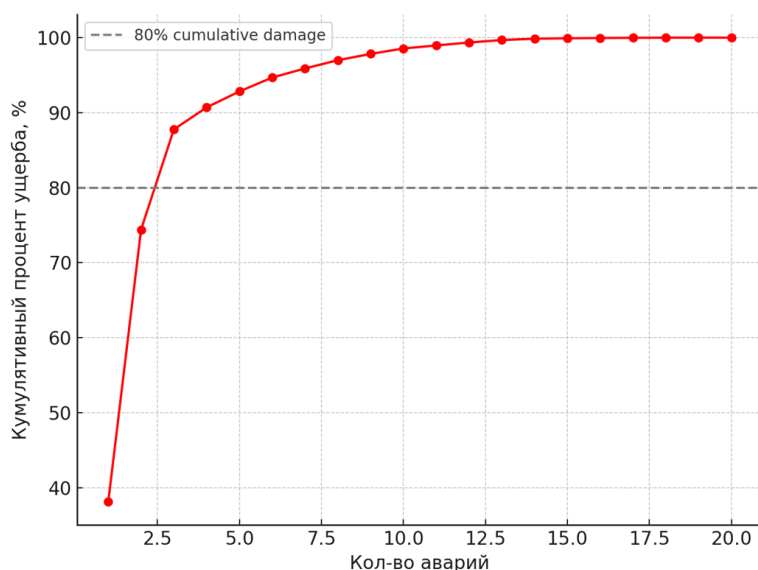


Рисунок 5. – Кумулятивный процент ущерба по авариям

Поведение графика подтверждает, что для целей рационального управления рисками ЧС на уровне производственного объекта важно не равномерное распределение ресурсов, а приоритизация защитных мер, направленных на предупреждение именно этих крайне разрушительных, хотя и редких, инцидентов.

Основная часть

Эффективное управление техногенными рисками требует не только учета вероятности реализации опасных событий, но и оценки их последствий с учетом неопределенности. При этом традиционные методы, основанные на вероятностно-статистических оценках, демонстрируют ограниченную применимость в условиях, где ключевую роль играют редкие, но высокоразрушительные сценарии ЧС для производственного объекта. В связи с этим все большее внимание уделяется использованию подходов, учитывающих асимметрию распределений ущерба и вклад отдельных событий в общую неопределенность.

Одним из ключевых понятий в современной концепции безопасности является остаточный риск – риск, сохраняющийся после внедрения комплекса защитных мер. Согласно международным стандартам [7] безопасность достигается не полной нейтрализацией угроз, а минимизацией остаточного риска до социально приемлемого уровня.

Формально остаточный риск R_r можно выразить через произведение остаточной вероятности реализации сценария ЧС P_r и остаточного ущерба S_r :

$$R_r = P_r \cdot S_r. \quad (1)$$

Для сравнения различных защитных мер применяется показатель их эффективности

$$E_i = (S_i^0 - S_i^r) / C_i, \quad (2)$$

где S_i^0 – ожидаемый ущерб до внедрения i -й защитной меры;
 S_i^r – остаточный ущерб после внедрения i -й защитной меры;
 C_i – затраты на реализацию i -й защитной меры.

Такая постановка позволяет оценивать эффективность затрат не абстрактно, а в контексте конкретных сценариев реализации рисков ЧС.

Применение энтропийных методов для анализа риска обосновано необходимостью учитывать не только количественные, но и структурные характеристики неопределенности. Энтропия в теории информации (К. Шеннон) позволяет оценить «информационную неопределенность» распределения вероятностей различных сценариев ЧС по формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i. \quad (3)$$

Значение H служит индикатором распределенности рисков: при равномерной вероятности всех сценариев ЧС энтропия максимальна, при доминировании одного сценария ЧС – минимальна. Это позволяет вводить понятие информационной значимости сценария ЧС по формуле:

$$I_i = -P_i \cdot \log_2 P_i. \quad (4)$$

В ряде работ, например [3; 4], отмечается, что именно информационно значимые сценарии ЧС, даже с малой вероятностью, способны радикально изменить общую оценку риска и принятие решений.

Современные исследования [3–5] демонстрируют, что распределения ущерба от катастрофических событий – будь то аварии на НПЗ, выбросы токсичных веществ или взрывы – подчиняются fat-tail закону. Это означает, что вероятность крайне разрушительных событий существенно выше, чем прогнозируется нормальным распределением.

С точки зрения управления рисками ЧС это означает необходимость смещения фокуса от оценки среднего ущерба к выявлению редких, но критических сценариев ЧС, способных формировать непропорционально высокий вклад в общий риск.

Методика и математическая модель. В рамках поставленной задачи приоритизации защитных мер на опасных производственных объектах, подверженных техногенным чрезвычайным ситуациям, разработана модель, ориентированная на минимизацию совокупного остаточного риска (формула (5)) с учетом ограниченности бюджета, а также неопределенности и информационной значимости сценариев ЧС. Расчеты производятся по формулам, приведенным в таблице 1. Информационная значимость I_i выражается в битах и отражает вес сценария ЧС в общей неопределенности системы согласно подходу Шеннона.

Модель базируется на следующих исходных допущениях:

- система анализа охватывает конечное множество n сценариев ЧС;
- каждый i -й сценарий ЧС характеризуется исходной вероятностью реализации P_i , остаточной вероятностью после применения защитных мер P_i^r , характеризующихся результативностью k_i , ущербом до применения мер S_i^0 , остаточным ущербом после применения мер S_i^r , стоимостью мер C_i , и их эффективностью E_i ;
- бюджет на реализацию защитных мер ограничен значением B .

Таблица 1. – Основные расчетные показатели модели минимизации остаточного риска

Показатель	Формула	Интерпретация
Остаточный риск	$R_r = P_r \cdot S_r$	Риск после реализации меры, млн руб.
Эффективность защитной меры	$E_i = (S_i^0 - S_i^r) / C_i$	Ущерб, предотвращенный на единицу затрат, руб. ущерба / руб. затрат
Информационная значимость	$I_i = -P_i \cdot \log_2 P_i$	Вклад сценария ЧС в энтропию

Целевая функция имеет вид:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n [\delta_i \cdot (P_i^r S_i^r) + (1 - \delta_i) \cdot (P_i S_i^0)], \quad (5)$$

где $\delta_i = 1$, если защитная мера для i -го сценария ЧС выбрана (используется остаточная вероятность P_i^r и остаточный ущерб S_i^r), и $\delta_i = 0$ – в противном случае (исходная вероятность P_i и ущерб до применения защитных мер S_i^0). При выборе защитной меры меняется не только ущерб, но и вероятность события.

Тогда оптимизационная модель общего остаточного риска при заданных ограничениях примет вид:

$$\min_{\delta_i} R_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n [\delta_i \cdot (P_i^r S_i^r) + (1 - \delta_i) \cdot (P_i S_i^0)]. \quad (6)$$

Ограничения:

1. Бюджет: $\sum_{i=1}^n \delta_i C_i \leq B$.
2. Двоичное ограничение на выбор меры: $\delta_i \in \{0; 1\}$, $i = \overline{1, n}$.
Приоритет предоставляется тем мерам, которые обладают:
 - высокой информационной значимостью I_i ;
 - высокой эффективностью E_i ;
 - способностью существенно снижать энтропию распределения рисков.

Для удобства интерпретации интегральный критерий $I_i \cdot E_i$ обозначим как показатель совокупной полезности U_i , отражающий вклад защитной меры в снижение остаточного риска. В силу (2) и (4) количественно совокупную полезность можно представить выражением:

$$U_i = (-P_i \cdot \log_2 P_i) \cdot (S_i^0 - S_i^r) / C_i. \quad (7)$$

Таким образом, U_i характеризует совокупный вклад меры в снижение остаточного риска и энтропии системы при ограниченных ресурсах. Показатель введен исключительно для удобства аналитической интерпретации совокупного эффекта мер и не используется в дальнейших расчетах модели.

Алгоритм реализации

1. Инициализация: задать вероятности P_i , ущербы S_i^0 , S_i^r , затраты C_i , определить бюджет B .
2. Вычисление: рассчитать значения R_i , I_i , E_i .
3. Сортировка: упорядочить сценарии ЧС по убыванию I_i , E_i .
4. Формирование набора защитных мер: выбрать защитные меры по убыванию значимости при соблюдении бюджетного ограничения.
5. Оптимизация: минимизировать $R_{\text{общ}}$.
6. Анализ остаточной энтропии H для оценки степени неопределенности после выбора защитных мер.

Результаты анализа и расчетов. Для демонстрации работы предложенной модели был проведен численный эксперимент, основанный на условных данных по 8 возможным сценариям ЧС на промышленном объекте нефтепереработки (табл. 2). Все сценарии ЧС различаются по вероятности реализации, потенциальному ущербу, стоимости защитных мер и их результативности. Ограничение бюджета составляет 12 млн руб.

Для формирования исходных данных таблицы 2 проведен анализ аварийности на предприятиях нефтегазового комплекса России по материалам Ростехнадзора за 2018–2023 гг. На основании повторяющихся типов событий выделены восемь типовых сценариев ЧС, а их исходные вероятности рассчитаны по статистике 2021–2023 гг. как наиболее репрезентативного периода, отражающего современный уровень промышленной безопасности. Такой подход обеспечивает сопоставимость данных и соответствует методическим рекомендациям Ростехнадзора, а значения ущерба до защитных мер отражают усредненные потери по каждому классу событий.

Таблица 2. – Основные расчетные показатели модели минимизации остаточного риска

№	Сценарий ЧС	Вероятность P_i	Ущерб, млн руб.		Стоимость меры C_i , млн руб.	Эффективность E_i	Информационная значимость I_i
			до защитных мер S_i^0	после защитных мер S_i^r			
1	Пожар на резервуаре	0,18	150	90	2,5	24,0	0,445
2	Взрыв в цехе	0,07	400	250	3,5	42,9	0,268
3	Отказ КИПиА	0,20	50	30	1,0	20,0	0,464
4	Утечка токсичных газов	0,05	300	120	2,5	72,0	0,216
5	Массовое возгорание	0,03	500	200	4,0	75,0	0,151
6	Авария трубопровода	0,17	100	60	2,0	20,0	0,435
7	Электросбой	0,25	40	25	0,8	18,8	0,500
8	Попадание молнии	0,05	120	90	1,2	25,0	0,216

Выбор оптимального набора защитных мер. На основании совокупного критерия $I_i \cdot E_i$ при соблюдении бюджетного ограничения (12 млн руб.) выбраны следующие защитные меры: для сценариев ЧС 1, 2, 5 и 6 (табл. 4). Для проверки обоснованности выбора сценариев была проведена проверка альтернативных комбинаций защитных мер с расчетом остаточного риска для каждого набора. Сравнивались три варианта:

- текущий выбор: сценарии 1, 2, 5, 6 (общая стоимость – 12 млн руб., обеспечивает наименьший остаточный риск – 75,32 млн руб.);
- альтернатива 1: сценарии 2, 4 (10 млн руб., совокупный остаточный риск составил 99,1 млн руб.);
- альтернатива 2: сценарии 1, 4, 5 (11,8 млн руб., остаточный риск – 82,65 млн руб.).

Выбор сценария 6 вместо 4 обусловлен бюджетным ограничением: реализация защитной меры для сценария 4 (2,5 млн руб.) при включении в набор превысила бы лимит. Суммарный остаточный риск до применения защитных мер:

$$R_0 = \sum_{i=1}^8 P_i S_i^0 = 0,18 \cdot 150 + \dots + 0,05 \cdot 120 = 128 \text{ млн руб.}$$

Коэффициенты результативности k_i в модели отражают долю остаточного риска после внедрения защитных мер по каждому сценарию.

Их значения определяются на основе классификации защитных мер по категориям, учитывающей глубину воздействия на источник опасности или последствия. В работе используется пятиуровневая классификация, представленная в таблице 3.

Таблица 3. – Категории результативности защитных мер [6]

Категория	Тип защитных мер	Результативность R_i	Остаточный риск $k_i = 1 - R_i$
I	Исключение опасности (например, демонтаж источника)	1,0	0,0
II	Снижение опасного фактора до безопасного уровня	0,9–1,0	0,0–0,1
III	Конструктивные меры (дублирование, резервирование, ограждения)	0,7–0,9	0,1–0,3
IV	Информационные и организационные меры (обучение, допуски, сигнализация)	0,6–0,8	0,2–0,4
V	Реагирующие меры (ПЛАРН ⁵ , ПЛАС ⁶ , СИЗ ⁷)	0,3–0,5	0,5–0,7

При формировании набора защитных мер для оптимизации коэффициенты k_i присваиваются экспертно на основе:

- исторических данных по аналогичным объектам и событиям;
- моделирования последствий внедрения мер;
- оценки снижения уязвимости объекта на основе категорий.

Если защитная мера не применяется, считается $k_i = 1$ (риск сохраняется полностью). Так, для сценария ЧС 4 защитная мера не выбрана из-за бюджетного ограничения, поэтому указанный коэффициент принимается равным 1.

Скорректированные вероятности реализации сценариев ЧС после применения защитных мер (табл. 4) рассчитываются по формуле:

$$P_i^r = P_i \cdot k_i.$$

Таблица 4. – Совокупный приоритет сценариев ЧС и расчет остаточных вероятностей после реализации защитных мер

№ сценария ЧС	Показатель совокупной полезности $U_i = I_i \cdot E_i$	P_i (до защитных мер)	k_i (результативность защитных мер)	P_i^r (после защитных мер)
1	10,68	0,18	0,7	0,126
2	11,49	0,07	0,6	0,042
3	9,28	0,20	1	0,200
4	15,55	0,05	1	0,050
5	11,33	0,03	0,8	0,024
6	8,70	0,17	0,75	0,128
7	9,40	0,25	1	0,250
8	5,40	0,05	1	0,050

После применения выбранных защитных мер остаточный риск по выбранным сценариям ЧС (1, 2, 5, 6) составил 34,325 млн руб., а риск по оставшимся сценариям (3, 4, 7, 8), для которых меры не применялись, – 41 млн руб.:

$$R_r = \sum_{i=1}^n P_i^r S_i^r + \sum_{\delta_i=0}^8 P_i S_i^0 = 34,325 + 41 = 75,325 \text{ млн руб.}$$

⁵ ПЛАРН – план ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

⁶ ПЛАС – план локализации и ликвидации аварийных ситуаций.

⁷ СИЗ – средства индивидуальной защиты.

Снижение остаточного риска составило примерно 41 %, несмотря на реализацию защитных мер только по половине сценариев ЧС.

На рисунке 6 сравнение ожидаемого ущерба по всем восьми рассмотренным сценариям техногенных ЧС до и после реализации защитных мер.

Как видно из диаграммы, наибольший вклад в совокупный риск до применения мер обеспечивают сценарии ЧС 1, 2 и 4–6, что соответствует концепции fat-tail – распределение, в котором малая часть сценариев обуславливает большую часть ущерба.

Реализация защитных мер в приоритетных сценариях ЧС (1, 2, 5, 6) позволила существенно снизить остаточный риск именно в тех точках, где его концентрация была наибольшей, в то время как оставшиеся сценарии сохранили исходные уровни ущерба.

Визуальное сопоставление до и после позволяет продемонстрировать эффективность стратегии приоритизации на основе совокупного критерия $I_i \cdot E_i$ при ограниченном бюджете.

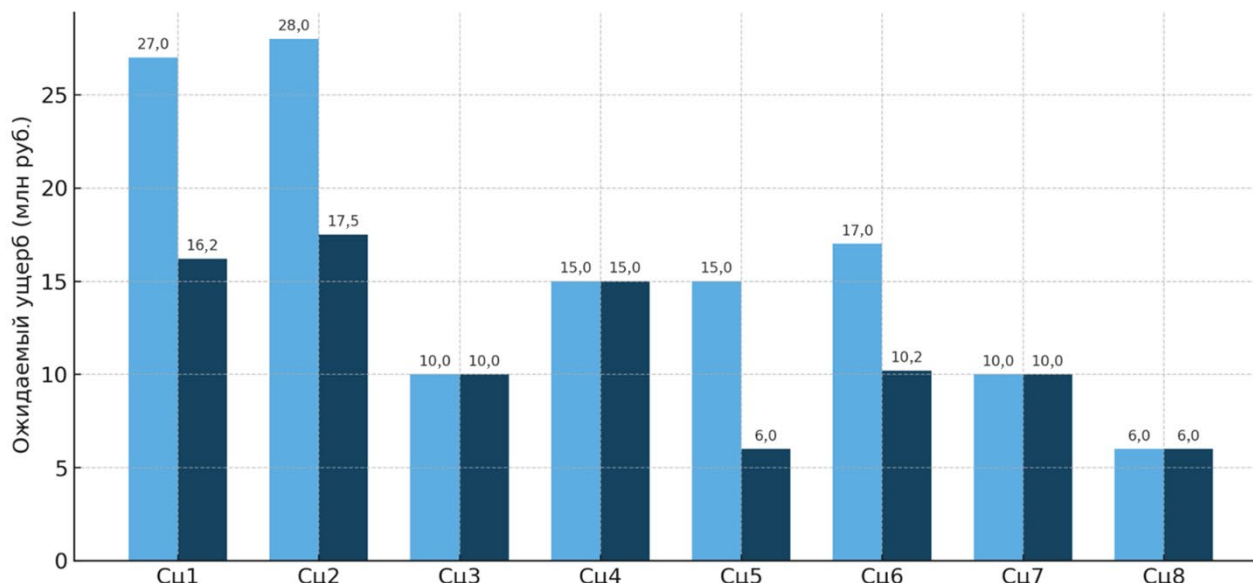


Рисунок 6. – Распределение ущерба по сценариям ЧС: до (■) и после (■) применения защитных мер

После приоритизации, направленной на «обрезание хвоста», происходит перераспределение – остаточная энтропия снижается, а вклад редких катастрофических сценариев ЧС в совокупный остаточный риск сокращается почти вдвое.

Энтропийный эффект. Исходная энтропия:

$$H_0 = -\sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i = 2,736 \text{ бита.}$$

Для выбранных сценариев ЧС (1, 2, 5, 6) зададим значения результативности защитных мер для снижения вероятности k_i , выбранные экспертным путем и отражающие ожидаемую результативность мер по снижению вероятности реализации сценариев ЧС (табл. 3):

Сценарий ЧС 1: $k_1 = 0,7 \rightarrow P_1^r = 0,18 \cdot 0,7 = 0,126$.

Сценарий ЧС 2: $k_2 = 0,6 \rightarrow P_2^r = 0,07 \cdot 0,6 = 0,042$.

Сценарий ЧС 5: $k_5 = 0,6 \rightarrow P_5^r = 0,03 \cdot 0,8 = 0,024$.

Сценарий ЧС 6: $k_6 = 0,75 \rightarrow P_6^r = 0,17 \cdot 0,75 = 0,1275$.

После применения мер (изменение вероятностей за счет снижения реалистичности сценариев ЧС):

$$H_r \approx 2,525 \text{ бита.}$$

Таким образом, уровень неопределенности системы снизился на 7,7 %, что подтверждает то, что реализация защитных мер влияет не только на величину остаточного риска, но и на структуру неопределенности сценариев ЧС, перераспределяя вероятности между событиями.

Из диаграммы видно, что реализация защитных мер по четырем сценариям ЧС, отобранным в результате оптимизации, обеспечила заметное снижение ожидаемого ущерба в каждом из этих сценариев: от 25 до 50 % в абсолютных значениях, что подтверждает высокую результативность подхода.

Сравнение столбцов «до» и «после» иллюстрирует вклад каждого конкретного сценария ЧС в общее снижение остаточного риска. Совокупный остаточный риск составил 75,3 млн руб., что соответствует снижению на 41,2 % по сравнению с исходным значением 128 млн руб.

Приоритизация по критерию $I_i \cdot E_i$ позволяет достигнуть наилучшего соотношения между снижением ущерба, энтропией и бюджетом. Данный подход обеспечивает целевое воздействие на наиболее опасные и неопределенные элементы системы.

Использование критерия $I_i \cdot E_i$ обосновано как компромисс между двумя ключевыми характеристиками сценария ЧС: его вкладом в общую неопределенность (энтропийная значимость) и экономической эффективностью защитной меры. Выбор произведения позволяет балансировать приоритизацию, избегая крайностей: например, меры с высокой информационной значимостью, но неэффективные по затратам или, наоборот, дешевые меры для мало значимых сценариев. Для верификации проведено сравнение с аддитивной моделью приоритизации ($\alpha I_i + \beta E_i$), где α, β – весовые коэффициенты. Результаты показали, что модель с произведением более чувствительна к выбросам в структуре риска (fat-tail сценарии), что соответствует цели минимизации остаточного риска в условиях высокой неопределенности.

Для проверки устойчивости результатов был проведен сценарный анализ с варьированием бюджета и вероятностей (табл. 5). Предложенный подход позволяет учитывать качественные особенности мер, их глубину воздействия на систему риска и устойчивость результатов к вариации исходных параметров. Модель демонстрирует стабильность оптимального выбора при изменениях вероятностей и бюджета.

Проведенный анализ устойчивости подтверждает надежность предложенной модели. При увеличении бюджета на 15 % в оптимальный набор добавляется защитная мера по сценарию ЧС 4, что дает дополнительное снижение риска на 12 %. При сокращении бюджета на 15 % из набора исключается менее приоритетная мера, риск возрастает на 18 %. Варьирование вероятностей на ± 20 % не изменяет оптимальный набор защитных мер (1, 2, 5, 6), а колебание итогового риска не превышает ± 9 %. Это свидетельствует о стабильности модели при изменении как экономических, так и вероятностных параметров.

Таблица 5. – Сценарный анализ с варьированием бюджета и вероятностей

Параметр	Изменение	$R_{\text{общ}}$, млн руб.	$\Delta R_{\text{общ}}$	Оптимальный набор мер
Базовый сценарий	–	75,32	–	
Бюджет	+15 % (13,8 млн руб.)	66,28	–12 % риска	1, 2, 4, 5, 6
Бюджет	–15 % (10,2 млн руб.)	88,91	+18 % риска	1, 2, 5
Вероятности	± 20 % случайное варьирование	68,50–82,10	± 9 % риска	стабилен: 1, 2, 5, 6

Обсуждение результатов. Проведенный численный эксперимент продемонстрировал высокую эффективность предложенного подхода к приоритизации защитных мер на основе совмещенного критерия, учитывающего как эффективность меры, так и информационную значимость соответствующего сценария ЧС. Данный критерий позволил не только достичь значительного сокращения остаточного риска при ограниченном бюджете, но и обеспечить целенаправленное снижение неопределенности в системе за счет воздействия на наиболее критичные и недостаточно учтенные сценарии.

Снижение энтропии на ≈ 12 % в результате оптимизации подтверждает, что модель воздействует не только на численные значения ущерба, но и на качественные параметры системы риска. Это особенно важно для объектов, находящихся в условиях высокой технологической неопределенности, где даже малое изменение вероятности реализации сценария может иметь стратегические последствия.

Заключение

Управление техногенными рисками в современных условиях требует перехода от статических и усредненных моделей к более гибким, адаптивным и чувствительным к структуре неопределенности подходам. В рамках статьи предложен интегральный показатель значимости сценариев ЧС, который объединяет вклад в энтропию, ущерб и остаточную вероятность, позволяя формализовать отбор защитных мер в условиях ограниченного бюджета. Разработанная модель приоритизации защитных мер демонстрирует, как интеграция энтропийного анализа с экономической оценкой эффективности мер позволяет не только снижать ущерб, но и системно управлять распределением рисков.

Особенно важно, что модель учитывает ключевой структурный фактор – fat-tail природу распределения ущерба, характерную для чрезвычайных ситуаций на объектах с повышенной опасностью. За счет акцента на информационно значимые, но маловероятные сценарии ЧС достигается оптимизация не только в числовом, но и в стратегическом смысле – устойчивость объекта к редким, но катастрофическим событиям возрастает.

Несмотря на эффективность предложенной модели, ее применение ограничено зависимостью от экспертных оценок входных параметров (вероятностей, ущербов, результативности), без учета корреляций между сценариями ЧС и статичностью в условиях динамично меняющейся среды. Перспективным направлением развития является создание обучаемой версии модели с интеграцией байесовских методов обновления параметров на основе данных мониторинга аварий, результативности внедренных мер. Это позволит реализовать адаптивное управление рисками с непрерывной перекалибровкой приоритетов, минимизируя влияние редких событий за счет сочетания машинного обучения для частых сценариев и симуляционного моделирования для катастрофических «черных лебедей», а интеграция с цифровыми двойниками объектов обеспечит предиктивную оценку эффективности мер до их внедрения.

Практическая значимость заключается в возможности адаптации модели под конкретные условия предприятия и отрасли, с последующим включением в автоматизированные системы поддержки принятия решений в области промышленной и техносферной безопасности. Использование обучаемых компонентов дополнительно усиливает потенциал модели, позволяя учитывать изменяющиеся условия и историю реализации сценариев ЧС, что делает ее особенно актуальной для применения в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков, А.В. Разработка методики по обоснованию перечня мероприятий по снижению ущерба от возможных аварий на нефтеперерабатывающих объектах / А.В. Рыбаков, П.А. Янышев // Техносферная безопасность. – 2025. – № 1 (46). – С. 153–164. – EDN: XBESOM.
2. Fedorets, A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk / A. Fedorets // Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Vol. 19. – Special Issue № 6 (81). – Part I. – P. 88–95. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/current-concept-of-risk-the-higher-the-probability-of-an-event-the-lower-the-risk> (date of access: 06.06.2025).
3. Jo, H.-H. Large variance and fat tail of damage by natural disaster / H.-H. Jo, Y.-L. Ko // Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management: proceedings of the 2nd International conference on vulnerability and risk analysis and management (ICVRAM 2014) and the 6th International symposium on uncertainty modeling and analysis (ISUMA 2014), Liverpool, United Kingdom, July 13–16, 2014. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014. – P. 2744–2752. – DOI: 10.1061/9780784413609.277.
4. Chen, W. Invulnerability analysis of nuclear accidents emergency response organization network based on complex network / W. Chen, S. Zou, C. Qiu, J. Dai, M. Zhang // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 56, No. 8. – P. 2923–2936. – DOI: 10.1016/j.net.2024.02.053.
5. Weitzman, M.L. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change / M.L. Weitzman // Review of Environmental Economics and Policy. – 2011. – Vol. 5, No. 2. – P. 275–292. – DOI: 10.1093/reep/rer006.
6. Крецу, Р.М. Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера: методология и практическое применение / Р.М. Крецу, А.В. Рыбаков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 451–461. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. – EDN: YGDFUJ.
7. Risk management – Principles and guidelines: ISO 31000:2009. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 24 p.

**Приоритизация мер снижения рисков техногенных чрезвычайных ситуаций
с учетом вклада сценариев в общую неопределенность**

**Prioritization of measures to reduce the risks of man-made emergencies taking into account
the contribution of scenarios to overall uncertainty**

Крещу Ромина Маратовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, аспирант

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

SPIN-код: 8973-2818

Romina M. Kretsu

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, postgraduate student

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Рыбаков Анатолий Валерьевич

доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, профессор

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

SPIN-код: 8654-3788

Anatoliy V. Rybakov

Grand PhD in Technical Sciences, Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, Professor

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

PRIORITIZATION OF MEASURES TO REDUCE THE RISKS OF MAN-MADE EMERGENCIES TAKING INTO ACCOUNT THE CONTRIBUTION OF SCENARIOS TO OVERALL UNCERTAINTY

Kretsu R.M., Rybakov A.V.

Purpose. Development of a quantitative measure of the contribution of emergency scenarios to the overall uncertainty of the risk of man-made emergencies at fuel and energy facilities, based on the entropy of the system, the informational significance of individual scenarios and the degree of effectiveness of protective measures. This will allow for the consideration of low-probability but high-informational scenarios and ensure a rational choice of measures within a limited budget.

Methods. The primary method utilizes an information-entropy approach, allowing for a quantitative assessment of the contribution of each emergency scenario to the overall uncertainty of the system. An optimization model for selecting protective measures is constructed, taking into account their effectiveness, cost, and the informational significance of the scenarios. A numerical experiment is conducted to evaluate the effectiveness of the proposed approach under conditions of limited budgets and multiple risks.

Findings. The study's results demonstrated that using the informational significance of scenarios enables the development of more effective resource allocation strategies. The proposed model reduces residual risk at a lower cost compared to classical approaches. A numerical experiment confirmed the method's applicability for the informed selection of protective measures under conditions of high uncertainty and limited budgets for preventing man-made emergencies.

Application field of research. The developed model can be applied to risk management systems at industrial and infrastructure facilities exposed to man-made emergencies. The approach is relevant for designing civil defense action plans, justifying safety investments, and developing digital decision support platforms in resource-constrained environments with high uncertainty.

Keywords: safety, emergency situations, risk management, entropy analysis, risk assessment, man-made disasters, uncertainty analysis, accident prevention.

(The date of submitting: July 15, 2025)

REFERENCES

1. Rybakov A.V., Yanyshv P.A. Razrabotka metodiki po obosnovaniyu perechnya meropriyatiy po snizheniyu ushcherba ot vozmozhnykh avariya na neftepererabatyvayushchikh ob"ektakh [The development of the methodology for substantiating a list of measures to reduce damage from possible accidents at oil refineries]. *Technosphere Safety*, 2025. No. 1 (46). Pp. 153–164. (rus). EDN: XBESOM.
2. Fedorets A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk. *Reliability: Theory & Applications*, 2024. Vol. 19. Special Issue № 6 (81). Part I. Pp. 88–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/current-concept-of-risk-the-higher-the-probability-of-an-event-the-lower-the-risk> (date of access: 06.06.2025).
3. Jo H.-H., Ko Y.-L. Large variance and fat tail of damage by natural disaster. *Proc. of the 2nd International conference on vulnerability and risk analysis and management (ICVRAM 2014) and the 6th International symposium on uncertainty modeling and analysis (ISUMA 2014) «Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management»*, Liverpool, United Kingdom, July 13–16, 2014. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014. Pp. 2744–2752. DOI: 10.1061/9780784413609.277
4. Chen W., Zou S., Qiu C., Dai J., Zhang M. Invulnerability analysis of nuclear accidents emergency response organization network based on complex network. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024. Vol. 56, No. 8. Pp. 2923–2936. DOI: 10.1016/j.net.2024.02.053.
5. Weitzman M.L. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2011. Vol. 5, No. 2. Pp. 275–292. DOI: 10.1093/reep/rr006.
6. Kretsu R.M., Rybakov A.V. Entropiynny analiz chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenogo kha-raktera: metodologiya i prakticheskoe primenenie [Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 4. Pp. 451–461. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. EDN: YGDFUJ.
7. ISO 31000:2009. Risk management – Principles and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2009. 24 p.

Copyright © 2025 Kretsu R.M., Rybakov A.V.

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

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕГАТИВНЫМ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ПРИ ГАЗОДОБЫЧЕ

Амшинов Н.М., **Ажмухамедов И.М.**

Цель. Изложение разработанной методики управления рисками чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при газодобыче, позволяющей отобрать эффективный набор мероприятий для устранения или уменьшения указанных рисков.

Методы. В основу разработки представленной методики положен теоретико-множественный подход.

Результаты. Изложены этапы разработанной методики управления рисками чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при газодобыче: построение кривой приемлемого риска; определение значимых экологических рисков, требующих немедленного устранения; определение эффективных управляющих воздействий, позволяющих снизить риски до приемлемых значений путем «обрыва» наиболее опасных цепочек чрезвычайных ситуаций.

Область применения исследований. Применение изложенной методики по снижению экологических рисков при газодобыче позволит эффективно снижать уровень рисков компании и уменьшать риски чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при эксплуатации газодобывающих скважин.

Ключевые слова: риски чрезвычайных ситуаций, негативные экологические воздействия, система поддержки принятия решений, эксплуатация газодобывающих скважин, приемлемый риск.

(Поступила в редакцию 26 августа 2025 г.)

Введение

Обеспечение безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) является приоритетной задачей эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО). Одним из направлений в рамках данной задачи является предупреждение чрезвычайных ситуаций, способных привести к негативным экологическим последствиям. Количество такого рода ЧС стало стремительными темпами возрастать в связи с увеличением доли используемых пожаро-, взрыво-, химически опасных технологий, являющихся основными источниками загрязнения природы. Несмотря на то что разработано множество нормативных документов федерального и отраслевого уровня, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций, воздействие на природу со стороны ОПО остается на очень высоком уровне.

Оценке и управлению рисками при газодобыче посвящен ряд работ отечественных [1–3] и зарубежных авторов [4–7]. Отмечается, что эффективное управление рисками может быть осуществлено в рамках одного из двух основных подходов: детерминированного и вероятностного. Однако для реализации данных подходов необходимо большое количество статистических данных, собрать которые часто не представляется возможным. Кроме того, задача оценки рисков ЧС, приводящих к негативным экологическим воздействиям (НЭВ) при газодобыче, содержит большую долю как объективной, так и субъективной неопределенности, что затрудняет формализацию процесса оценки и управление указанными рисками.

В работе [8] была изложена методика оценки подобных рисков при эксплуатации газодобывающих скважин (ГДС). В ее основе лежит рассмотрение цепочки событий, приводящих к негативным экологическим последствиям от ЧС:

«Осложнения на ГДС (О)» → «Техногенная ЧС (ТЧС)» →

→ «Поражающее воздействие источника техногенной ЧС на окружающую среду (ПВ)» → (1)

→ «Экологические последствия от ПВ (ЭППВ)».

Согласно указанной методике прежде всего определяются потенциально возможные осложнения на ГДС и перечень связанных с ними ТЧС и ПВ.

После этого оцениваются вероятности возникновения экологических последствий от ПВ в результате поражающих воздействий источника техногенной ЧС, возникших в связи с ТЧС, которые, в свою очередь, были вызваны осложнениями. Таким образом, выявляются цепочки событий, которые необходимо устранить.

Расшифруем понятия ТЧС, ПВ и экологические последствия от ПВ.

Под термином техногенная чрезвычайная ситуация – понимается ЧС, при которой происходит опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, а также к нанесению ущерба окружающей природной среде.

Под поражающим воздействием источника техногенной ЧС на окружающую среду понимается ЧС, в связи с которой происходит негативное влияние одного или совокупности поражающих факторов источника техногенной чрезвычайной ситуации на окружающую природную среду.

Экологические последствия от ПВ – это следствие негативного экологического воздействия на окружающую среду в результате указанных поражающих воздействий.

В свою очередь, по методике, изложенной в работе [8], оценивается вероятность возникновения последствий от ПВ ($P^{ПВ}$) и ущерб от этих последствий ($U^{ПВ}$). В результате при перемножении двух данных параметров получаем величину R – риск чрезвычайной ситуации, приводящей к негативному экологическому воздействию при газодобыче.

Изложенная методика по оценке вышеуказанных рисков позволяет определить, насколько вероятно наступление экологических последствий от ПВ с учетом числовых значений параметров и вербальных оценок экспертов, рассчитать риски ЧС, приводящих к НЭВ при газодобыче, и оценить, насколько данный риск является приемлемым.

Лицу, принимающему решения (ЛПР), при выборе управляющих воздействий (УВ), направленных на ликвидацию потенциально возможных причин возникновения экологических последствий от ПВ или минимизацию указанных последствий, необходимо учесть множество факторов: наличие необходимого количества финансовых средств и времени, квалифицированного персонала, необходимого оборудования и т.п. Кроме этого, ЛПР необходимо определить приоритетность проведения работ по снижению экологических рисков и при этом подобрать наиболее эффективный набор мер, позволяющих «оборвать» наиболее опасные цепочки событий, приводящих к экологическим последствиям от ПВ.

Таким образом, данная задача является плохо формализуемой (из-за большого количества вербальных, нечисловых оценок экспертов) и слабоструктурированной (из-за наличия значительного числа взаимосвязанных между собой факторов, наличие которых необходимо учесть при принятии решений).

Исходя из этого, целью данной работы явилось изложение результатов разработки методики управления рисками чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при газодобыче, позволяющей отобрать эффективный набор мероприятий для устранения или уменьшения указанных рисков.

Формальная постановка задачи. Для формальной постановки задачи необходимо выполнить следующие шаги. Получив по методике, изложенной в работе [8], список цепочек событий, которые способны привести к экологическим последствиям от ПВ, ранжируем их следующим образом.

Экологические последствия от ПВ могут быть разбиты на 3 класса по степени ущерба (незначительный, средний, значительный). Отнесение к определенному классу в дальнейшем влияет на оценку ущерба от того или иного экологического последствия от ПВ. Например, наименование экологического последствия от ПВ может выглядеть как «Значительный выброс углеводородов в атмосферу». Далее согласно нормативным документам будет определен ущерб от данного экологического последствия от ПВ с учетом его степени отрицательного влияния на окружающую среду. Если объем выбросов значительный и вред от воздействия высокий, то и ущерб будет оценен как высокий. Конкретные численные значения для каждого экологического последствия от ПВ рассчитываются по соответствующим формулам оценки рисков ЧС, приводящих к НЭВ при газодобыче, которые отражены в нормативных документах [9–13].

В свою очередь, множество управляющих воздействий A , способных прервать выявленные цепочки событий, делится на следующие подмножества:

A^O – подмножество управляющих воздействий, направленных на недопущение возникновения осложнений;
 $A^{TЧС}$ – подмножество управляющих воздействий для недопущения ТЧС при возникших осложнениях;
 $A^{ПВ}$ – подмножество управляющих воздействий для недопущения ПВ при уже возникших ТЧС;
 $A^{ЭППВ}$ – подмножество управляющих воздействий для недопущения ЭППВ от возникших ПВ.

$$A = \{A^O, A^{TЧС}, A^{ПВ}, A^{ЭППВ}\}. \quad (2)$$

Каждое из подмножеств включает управляющие воздействия, для которых как существуют достаточные ресурсы для их реализации, так и для которых они отсутствуют. Эксперты формируют полный перечень УВ. После этого необходимо выделить набор управляющих воздействий, имеющих достаточные ресурсы. Для данного набора было введено понятие «Активный арсенал управляющих воздействий».

Управляющее воздействие, которое не обеспечено достаточным количеством ресурсов (например, кадровыми, финансовыми и т.п.), не входит в активный арсенал. Если ЛПР считает, что такое управляющее воздействие следует в дальнейшем реализовать, то он может дать команду по обеспечению данного УВ необходимыми ресурсами.

Таким образом, подмножества, указанные в формуле (2), примут вид:

$$A^O = \{a_i^O\}_{i=[1..N]}; \quad A^{TЧС} = \{a_k^{TЧС}\}_{k=[1..K]}; \quad A^{ПВ} = \{a_j^O\}_{j=[1..J]}; \quad A^{ЭППВ} = \{a_b^{ЭППВ}\}_{b=[1..B]}.$$

Сформированные новые подмножества представляют из себя активный арсенал управляющих воздействий, которые можно применить для устранения одного или нескольких событий в опасных с точки зрения возникновения ЭППВ цепочках.

При этом риск ЧС, приводящий к НЭВ, в свою очередь, состоит из суммы двух рисков:

$$R = R^{ЭППВ} + R^П, \quad (3)$$

где $R^{ЭППВ}$ – риск экологических последствий от поражающих воздействий источника ТЧС, рассчитанный по методике, изложенной в работе [8];

$R^П$ – побочный риск, возникающий в результате использования управляющего воздействия для устранения одного из событий.

Например, если $R^{ЭППВ}$ был изначально по степени критичности классифицирован как средний по степени критичности ущерба, то $R^П$ должен иметь незначительную степень критичности ущерба.

С учетом вышесказанного из множества A выделяется соответствующее подмножество $\bar{A} = \{\bar{A}^O, \bar{A}^{TЧС}, \bar{A}^{ПВ}, \bar{A}^{ЭППВ}\}$ управляющих воздействий, применение которых не приводит к рискам, равным или превышающим те риски, на устранение которых данные управляющие воздействия направлены.

Получив набор управляющих воздействий, снижающих риски до приемлемого уровня, необходимо выбрать такой набор воздействий, для реализации которого требуются минимальные затраты Z .

При этом затраты на управляющие воздействия выражаются следующей формулой:

$$Z = \alpha_1 F + \alpha_2 P + \alpha_3 T + \alpha_4 E + \alpha_5 M, \quad (4)$$

где F – финансовые затраты;

P – количество персонала для определенного управляющего воздействия;

T – время для реализации управляющего воздействия;

E – количество необходимого оборудования;

M – количество необходимых материалов;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – весовые коэффициенты для каждого из параметров F, P, T, E, M , отражающие их значимость для ЛПР.

Необходимо добиться ситуации, при которой текущий риск не превышает приемлемого значения и при этом затраты не будут превышать заданного уровня.

Таким образом, формальная постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\text{def } \bar{A}: R \leq R^{\Delta}, Z \leq Z^*, \quad (5)$$

т.е. необходимо найти набор таких управляющих воздействий \bar{A} , который позволит снизить риск ЧС, приводящий к НЭВ, при газодобыче до приемлемых значений допустимого риска R^{Δ} либо ниже него (в (5) def – это оператор определения). При этом уровень затрат не должен превышать уровень допустимых затрат Z^* , которые компания может потратить на реализацию управляющих воздействий.

Для оценки приемлемых значений риска в работе [8] было введено понятие «приемлемый риск» – это такой риск, значение которого компания готова принять. С целью определения критических рисков для компании в работе была предложена методика оценки приемлемых экологических рисков, в которой согласно построению кривой приемлемого риска (КПР) определяются текущие значимые риски (ТЗР).

Основная часть

Методика управления рисками ЧС, приводящих к НЭВ, в процессе газодобычи.

Для решения поставленной задачи предлагается методика управления рисками ЧС, приводящих к НЭВ, в процессе газодобычи, общая схема которой представлена на рис. 1.

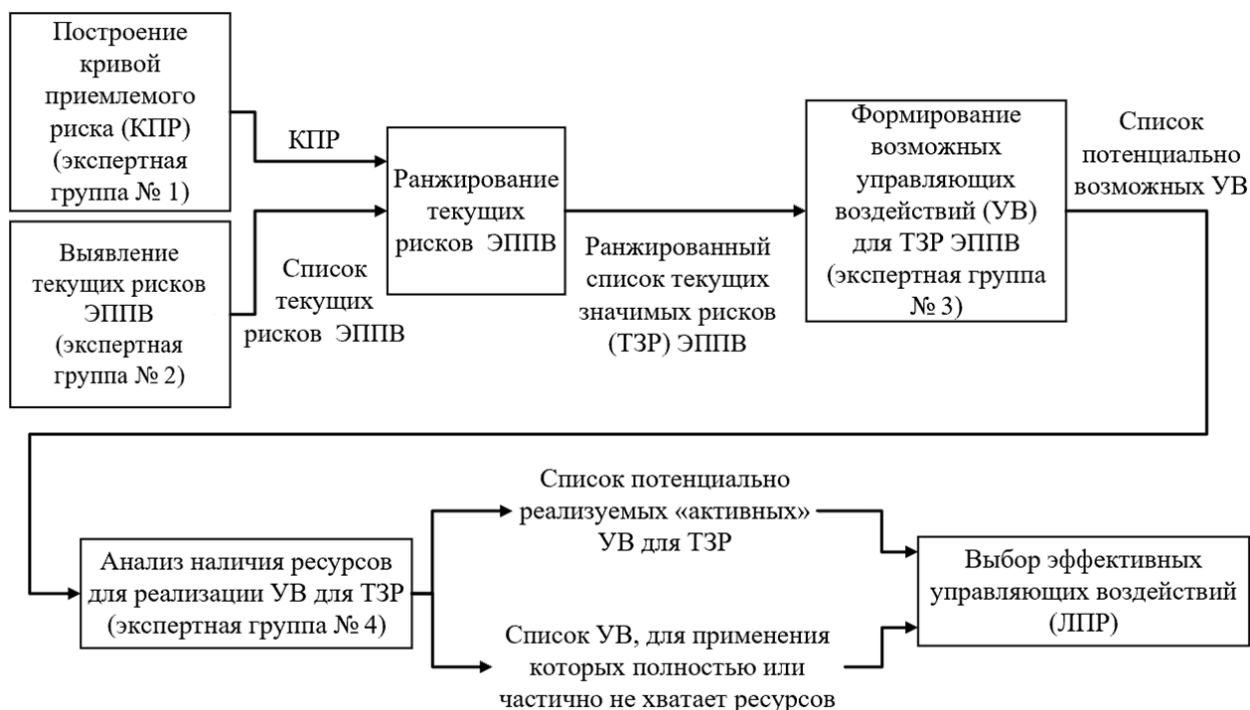


Рисунок 1. – Общая схема методики управления рисками ЧС, приводящих к НЭВ, в процессе газодобычи

Рассмотрим каждый блок общей схемы подробнее. На рисунке 2 представлена схема построения КПР.

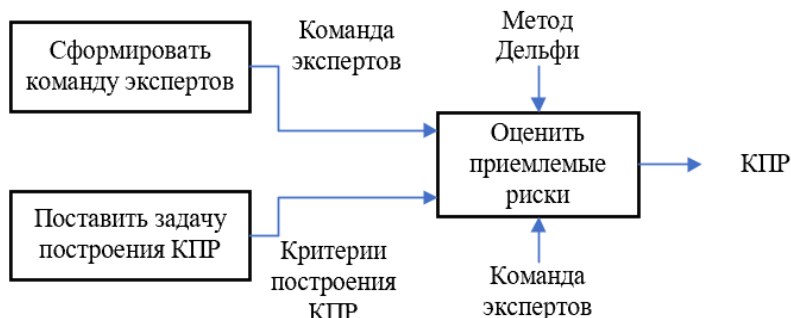


Рисунок 2. – Схема построения КПР

В общем виде функциональная зависимость приемлемой вероятности (P^{Π}) возникновения различных значений ущерба от ЭППВ на ГДС имеет вид [8]:

$$P^{\Pi} = P^{\Pi}(U^{\text{ЭППВ}}), \quad (6)$$

где $P^{\Pi}(U^{\text{ЭППВ}})$ – монотонно убывающая функция от $U^{\text{ЭППВ}}$ (ущерб от последствий ПВ), отражающая приемлемую вероятность возникновения различных значений ущерба.

В качестве функции $P^{\Pi}(U^{\text{ЭППВ}})$ могут быть использованы различные зависимости. При малых уровнях ущерба может сохраняться постоянное значение приемлемой вероятности ущерба от ЭППВ, равное «1», до тех пор, пока не начнется его снижение. В этом случае целесообразно применить функцию вида:

$$P^{\Pi} = a \cdot \left[1 + e^{-b(U^{\text{ЭППВ}} - U_{\text{НЗ}}^{\text{ЭППВ}})} \right]^{-1}, \quad (7)$$

где a и b – константы, определяемые экспертным оцениванием возможных положений отдельных точек КПР, которые задаются экспертной группой, при заданных значениях $U^{\text{ЭППВ}}$ и последующей их аппроксимацией по методу наименьших квадратов;

$U_{\text{НЗ}}^{\text{ЭППВ}}$ – незначительный ущерб, который организация готова безусловно принять (т.е. с $P^{\Pi} = 1$).

Если изменение вероятности P^{Π} начинается сразу, то можно использовать функцию вида:

$$P^{\Pi} = a \cdot e^{-b(U^{\text{ЭППВ}} - U_{\text{НЗ}}^{\text{ЭППВ}})}. \quad (8)$$

Для определения параметров в формулах (7) и (8) формируется экспертная группа № 1, в состав которой могут входить:

- представители руководства компании, курирующие направление «Добыча газа и газового конденсата»;
- сотрудники подразделений, занимающихся технологическим обеспечением ГДС;
- сотрудники подразделений, занимающихся финансовым сопровождением деятельности организации по добыче газа;
- внешние эксперты (при необходимости).

Критерии, по которым должен проводиться отбор, могут быть следующими: независимость экспертов, отсутствие какого-либо коммерческого, финансового или другого фактора, способного повлиять на принимаемые решения. Состав группы не должен быть меньше четырех человек.

Необходимо отметить, что существует некоторая величина критического ущерба $U_{\text{кр}}^{\text{ЭППВ}}$, превышение которой является для газодобывающей компании неприемлемой. Данный параметр определяется руководством компании и прописывается в нормативных документах как процент от капитализации компании. Например, если капитализация компании $C = 1$ млрд руб., а приемлемый процент ущерба, который компания готова принять $k = 1\%$, то $U_{\text{кр}}^{\text{ЭППВ}} = C \cdot \frac{k}{100\%} = 10$ млн руб.

При опросе экспертам предлагается оценить приемлемую вероятность различных значений ущерба, определенных как часть $U_{\text{кр}}^{\text{ЭППВ}}$. Для согласования мнений экспертов целесообразно использовать метод Дельфи.

Например, пусть после согласования мнений экспертов получена следующая вербальная оценка: приемлемую вероятность ущерба в 40 % от $U_{\text{кр}}^{\text{ЭППВ}}$ эксперты сочли равной «Выше среднего». Такую вербальную оценку необходимо перевести в числовую форму. Воспользуемся шкалой Харрингтона. Приемлемой вероятности «Выше среднего» соответствует промежуток от 0,64 до 0,8. За значение приемлемой вероятности, согласованное экспертами, возможно принять среднее значение данного промежутка, т.е. 0,72. Аналогичным образом получают другие значения классов приемлемых вероятностей. Первый класс – допустимая вероятность «Низкая (Н)», промежуток по шкале Харрингтона находится в пределах [0; 0,2), приемлемая вероятность $P_{\text{Н}}^{\Pi} = 0,1$; второй класс – «Ниже среднего (НС)», промежуток [0,2; 0,37), $P_{\text{НС}}^{\Pi} = 0,29$; третий класс – «Средняя (С)», [0,37; 0,64), $P_{\text{С}}^{\Pi} = 0,51$; четвертый класс – «Выше среднего (ВС)», [0,64; 0,8), $P_{\text{ВС}}^{\Pi} = 0,72$; пятый класс – «Высокая вероятность (ВВ)», [0,8; 1], $P_{\text{ВВ}}^{\Pi} = 0,9$.

Согласовав мнения экспертов, получаем пары значений допустимых вероятностей и приемлемых ущербов. Данные пары наносим на график в виде точек, которые аппроксимируются по методу наименьших квадратов функцией вида (7). В результате получаем кривую приемлемого риска (рис. 3).

Выявление текущих рисков ЭППВ. В работе [8] была предложена методика оценки рисков возникновения ЭППВ при газодобыче, основанная на рассмотрении цепочки событий (1).

Реализация данной методики требует поэтапной организации работ, к которым в первую очередь относится формирование соответствующей экспертной группы.

Согласно разработанной методике для определения рисков ЧС, приводящих к НЭВ, формируется экспертная группа № 2, состоящая из представителей мастеров по добыче газа, службы главного инженера, экологического отдела. Эта группа выполняет следующие шаги:

- определяет потенциально возможные осложнения на ГДС и перечень связанных с ними ТЧС, ПВ;
- оценивает вероятности возникновения ЭППВ в результате реализации возможных событий, возникших в связи с осложнениями;
- рассчитывает ущерб от ЭППВ;
- составляют список текущих рисков.

Далее необходимо определить ТЗР.

Ранжирование текущих рисков. Значения вероятностей и ущербов текущих рисков, которые были выявлены в предыдущем блоке, позволяют нанести соответствующие точки на рисунок, содержащий КПР (рис. 4).

Если некоторые точки, характеризующие текущие риски, находятся выше КПР, необходимо снизить риски.

Значимость каждого риска определяется как площадь криволинейного треугольника, образованного КПР и отрезками, характеризующими расстояние по вероятности и ущербу от точки, соответствующей риску, до КПР. Примеры подобных фигур для 1-го и 3-го рисков приведены на рисунке 4.

Площади таких криволинейных треугольников характеризуют величину, для которой было введено понятие «количество «избыточного» риска». Данная величина в дальнейшем будет обозначаться как ΔR_n .

Исходя из введенного определения, для вычисления количества «избыточного» риска предложено воспользоваться следующими формулами:

$$U^* = (\ln P_n - \ln a) / b + U_{НЗ}^{\text{ЭППВ}}, \quad (9)$$

$$\Delta R_n = P_n \cdot (U_n - U^*) - a \cdot \int_{U^*}^{U_n} e^{-b(U - U_{НЗ}^{\text{ЭППВ}})} dU = P_n \cdot (U_n - U^*) + \frac{a}{b} e^{bU_{НЗ}^{\text{ЭППВ}}} (e^{-bU_n} - e^{-bU^*}), \quad (10)$$

где P_n и U_n – это вероятность и ущерб, характеризующие определенный риск;
 U^* – максимально допустимый ущерб при вероятности P_n .

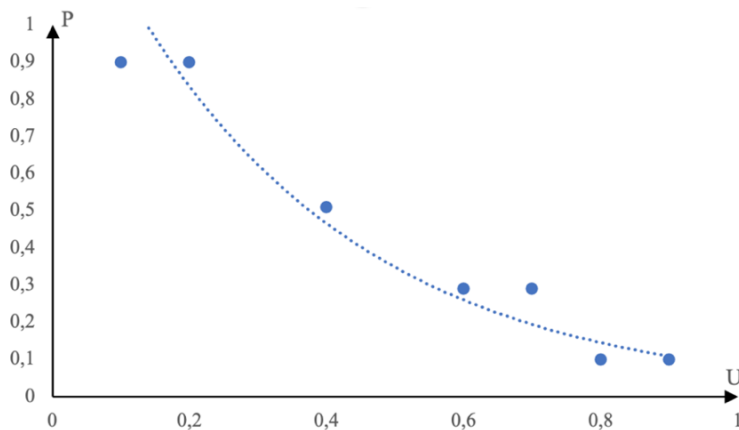


Рисунок 3. – Кривая приемлемого риска ЭППВ на ГДС

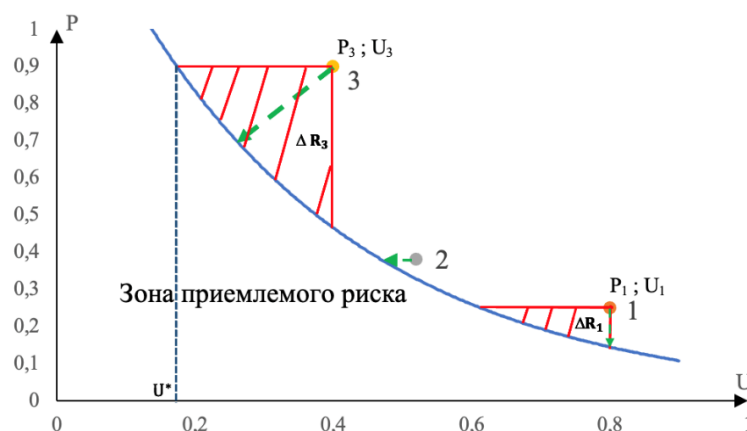


Рисунок 4. – График функции приемлемого риска с возможными траекториями снижения текущих рисков

После вычисления ΔR_n для каждого риска формируется список текущих значимых рисков, где риски будут расположены по уменьшению количества «избыточного» риска. Например, самым значимым на рисунке 4 является риск 3.

Снижение риска можно осуществить либо путем воздействия на вероятность его возникновения (снижение риска 1 на рис. 4), либо путем смягчения последствий от определенного риска, т.е. путем снижения ущерба (как это проиллюстрировано для риска 2 на рисунке 4). Кроме того, возможно использовать комбинированное воздействие, которое будет снижать и вероятность, и ущерб (снижение риска 3). При этом для риска 3 ни снижение ущерба, ни снижение вероятности его возникновения не являются достаточными для перемещения в зону приемлемого риска. Однако совместное использование данных управляющих воздействий приводит к тому, что риск становится приемлемым.

Формирование возможных управляющих воздействий для текущих значимых рисков. Определив ТЗР, необходимо для каждого из них уменьшить количество «избыточного» риска. Каждый риск возможно устранить одним или способами.

Для определения набора возможных способов устранения необходимо руководствоваться следующими основными критериями: стоимость реализации, надежность устранения риска, требовательность к ресурсам, время необходимое для реализации. Далее формируется ранжированный список возможных мер устранения каждого риска. Согласно вышеуказанным критериям определяется наиболее предпочтительный способ устранения ЭППВ, который будет находиться на 1-м месте по списку. Для определения способов устранения ТЗР и количества необходимых ресурсов требуется сформировать экспертную группу № 3, состоящую из представителей служб главного инженера, главного технолога, охраны труда, охраны окружающей среды.

Далее полученный список необходимо проанализировать на наличие ресурсов для реализации.

Анализ наличия ресурсов для реализации управляющих воздействий. Сформированный список возможных управляющих воздействий необходимо проанализировать на наличие у предприятия необходимых ресурсов. Алгоритм определения реализуемых управляющих воздействий представлен на рисунке 5.

Согласно данной схеме выбирается наиболее предпочтительное управляющее воздействие. Производится оценка на предмет наличия всех необходимых ресурсов для его реализации. Если необходимые ресурсы имеются, то данное УВ включается в список управляющих воздействий как способ устранения рассматриваемого риска. Осуществляется переход к рассмотрению списка УВ для следующего риска. Если же наиболее предпочтительное УВ не может быть реализовано в связи с отсутствием какого-либо ресурса, анализируется возможность реализации следующих по списку УВ. В случае если ни одно из управляющих воздействий, входящих в список по устранению рассматриваемого риска, не представляется возможным реализовать в связи с отсутствием каких-либо ресурсов, то данный риск остается необработанным. Он включается в отдельный список и выдается поручение по поиску необходимых ресурсов для реализации наиболее предпочтительного (т.е. стоящего во главе списка) УВ для данного риска.

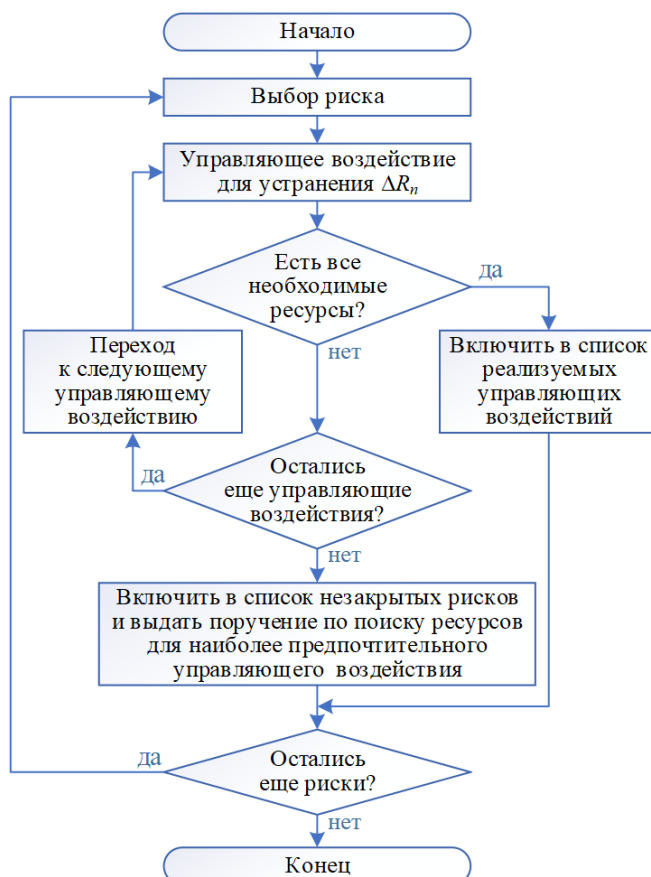


Рисунок 5. – Алгоритм определения УВ, реализация которых возможна с точки зрения обеспеченности ресурсами

Для реализации предложенного алгоритма необходимо сформировать экспертную группу № 4, состоящую из следующих специалистов: представителей финансового, кадрового блока, блока материально-технического обеспечения и т.д. (в соответствии со структурой каждого предприятия).

Заключение

В связи с ростом востребованности природного газа газодобывающим компаниям необходимо решать две противоположные задачи: с одной стороны, необходимо увеличивать объемы добычи; с другой стороны – снижать уровень негативного воздействия на экологию из-за различных происшествий, возникающих при эксплуатации газодобывающих скважин (ГДС). Для их предупреждения и недопущения необходимо учитывать большое количество факторов, значительная часть которых не имеет числовой оценки и часто оценивается экспертами в вербальной форме. Лицу, принимающему решения (ЛПР), трудно оперировать таким разнородным массивом информации, что часто приводит к принятию недостаточно обоснованных, а иногда неверных решений по снижению рисков ЧС, приводящих к негативным экологическим воздействиям (НЭВ), при газодобыче.

Изложенная в данной работе методика по управлению рисками ЧС, приводящих к НЭВ, при газодобыче предусматривает выполнение ряда этапов: построение кривой приемлемого риска (КПР), определение текущих значимых рисков, требующие немедленного устранения; определение эффективных управляющих воздействий, позволяющих снизить выявленные риски до приемлемых значений путем «обрыва» наиболее опасных цепочек событий. При выборе управляющих воздействий учитывается максимально полное множество факторов, таких как: наличие финансовых средств и времени, квалифицированного персонала, необходимого оборудования и т.п. Кроме этого, указанная методика позволяет ЛПР определить приоритетность проведения работ по снижению рисков ЧС, приводящих к НЭВ.

Таким образом, принятые ЛПР на основании предложенной методики решения позволят эффективно прогнозировать риски ЧС, приводящих к НЭВ, и их последствия в процессе эксплуатации ГДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басова, Е.А. Особенности протекания крупных пожаров на объектах нефтегазового комплекса и методика снижения аварийной эмиссии CO₂ / Е.А. Басова, С.Г. Ивахнюк, Л.А. Королева, В.В. Семенов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 325–336. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.325. – EDN: RWFTST.
2. Горленко, Н.В. Комплексная оценка экологических рисков объектов нефтегазодобычи / Н.В. Горленко, М.А. Мурзин, С.С. Тимофеева // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 1. – С. 48–52. – DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10110. – EDN: DCSZYA.
3. Панасенко, Н.Н. Техногенные риски строительства и эксплуатации нефтегазовых комплексов в акватории Каспийского моря / Н.Н. Панасенко, А.В. Синельщиков, П.В. Яковлев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2019. – № 4. – С. 46–59. – DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-46-59. – EDN: ZPOVJF.
4. Broderick, J.W. Environmental risk management and the role of environmental insurance / J.W. Broderick, D.R. Lavoie, A.J. Perel // Environmental Quality Management. – 2000. – Vol. 10, No. 1. – P. 3–12. – EDN: FMTYPH.
5. Bedford, T. Probabilistic risk analysis: foundations and methods / T. Bedford, R. Cooke. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 393 p.
6. Eckhard, R. Stanislaw Ulam, John von Neumann and the Monte Carlo method / R. Eckhard // Los Alamos Science. – 1987. – No. 15. – P. 131–137.
7. Abrahamsson, M. Treatment of uncertainty in risk based regulations and standards for risk analysis / M. Abrahamsson. – Lund: Lund university, 2000. – Report 3116. – 84 p. – URL: <https://portal.research.lu.se/ws/files/5392136/1259307.pdf> (date of access: 11.08.2025).
8. Amshinov, N. Assessment of risks of negative ecological impacts on the environment during operation of gas wells / N. Amshinov, O. Vybornova, I. Azhmukhamedov // Proc. of 12th Computer science online conference «Software Engineering Research in System Science» (CSOC 2023); ed. by R. Silhavy, P. Silhavy / Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 722. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 1 – P. 712–722. – DOI: 10.1007/978-3-031-35311-6_68.

9. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: 30 дек. 2001 г. № 195-ФЗ: принят Государственной Думой 20 дек. 2001 г.: одобр. Советом Федерации 26 дек. 2001 г. // Информационно-правовой портал Гарант.ру. – URL: <https://base.garant.ru/12125267> (дата обращения: 11.08.2025).
10. Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды: утв. приказом М-ва природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 28 янв. 2021 г. № 59 // Информационно-правовой портал Гарант.ру. – URL: <https://base.garant.ru/400289242> (дата обращения: 11.08.2025).
11. Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами: утв. Роскомземом 10 нояб. 1993 г. и Минприроды России 18 нояб. 1993 г. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9033369> (дата обращения: 11.08.2025).
12. Методика исчисления размера ущерба от загрязнения подземных вод: утв. приказом Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды 11 февр. 1998 г. № 81 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901742368> (дата обращения: 11.08.2025).
13. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства: утв. приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 13 апр. 2009 г. № 87 // Информационно-правовой портал Гарант.ру. – URL: <https://base.garant.ru/12167365> (дата обращения: 11.08.2025).

Методика управления рисками чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным экологическим воздействиям при газодобыче

Methodology for managing the risks of situations leading to negative environmental impacts during gas production

Амшинов Ника Мерабович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», кафедра информационной безопасности, преподаватель-исследователь

Адрес: ул. Татищева, 20а,
414056, г. Астрахань,
Южный федеральный округ, Россия
Email: amshinov.nika@yandex.ru
SPIN-код: 8808-2648

Nika M. Amshinov

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev»,
Chair of Information Security,
Lecturer and Researcher

Address: Tatishchev str., 20a,
414056, Astrakhan,
Southern Federal District, Russia
Email: amshinov.nika@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7107-1610

Азмухамедов Искандар Маратович

доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», кафедра информационной безопасности, профессор

Адрес: ул. Татищева, 20а,
414056, г. Астрахань,
Южный федеральный округ, Россия
Email: aim_agtu@mail.ru
SPIN-код: 5598-9820

Iskandar M. Azhmukhamedov

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev»,
Chair of Information Security,
Professor

Address: Tatishchev str., 20a,
414056, Astrakhan,
Southern Federal District, Russia
Email: aim_agtu@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9058-123X

METHODOLOGY FOR MANAGING THE RISKS OF SITUATIONS LEADING TO NEGATIVE ENVIRONMENTAL IMPACTS DURING GAS PRODUCTION

Amshinov N.M., Azhmukhamedov I.M.

Purpose. Presentation of the developed methodology for managing the risks of emergency situations leading to negative environmental impacts during gas production, which allows for the selection of an effective set of measures to eliminate or reduce these risks.

Methods. The development of the presented methodology is based on the set-theoretical approach.

Findings. The stages of the developed methodology for managing the risks of emergency situations leading to negative environmental impacts during gas production are presented: construction of an acceptable risk curve; identification of significant environmental risks requiring immediate elimination; determination of effective management measures that can reduce risks to acceptable levels by «breaking» the most dangerous chains of emergency situations.

Application field of research. The application of the described methodology for reducing environmental risks during gas production will effectively reduce the company's risk level and mitigate the risks of emergency situations leading to negative environmental impacts during the operation of gas production wells.

Keywords: emergency risks, negative environmental impacts, decision support system, operation of gas wells, acceptable risk.

(The date of submitting: August 26, 2025)

REFERENCES

1. Basova E.A., Ivakhnyuk S.G., Koroleva L.A., Semenov V.V. Osobennosti protekaniya krupnykh pozharov na ob"ektakh neftegazovogo kompleksa i metodika snizheniya avariynoy emissii CO₂ [Particularities of the occurrence of large fires at oil and gas facilities and methods of reducing emergency CO₂ emissions]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 325–336. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.325. EDN: RWFTST.
2. Gorlenko N.V., Murzin M.A., Timofeeva S. S. Kompleksnaya otsenka ekologicheskikh riskov ob"ektov neftegazodobychi [Comprehensive assessment of environmental risks at oil and gas production facilities]. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2020. No. 1. Pp. 48–52. (rus). DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10110. EDN: DCSZYA.
3. Panasenko N.N., Sinel'shchikov A.V., Yakovlev P.V. Tekhnogennyye riski stroitel'stva i eks-pluatatsii neftegazovykh kompleksov v akvatorii Kaspiskogo morya [Technogenic risks of building and operation of oil and gas complexes in offshore area of the Caspian Sea]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2019. No. 4. Pp. 46–59. (rus). DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-46-59. EDN: ZPOVJF.
4. Broderick J.W., Lavoie D.R., Perel A.J. Environmental risk management and the role of environmental insurance. *Environmental Quality Management*, 2000. Vol. 10, No. 1. Pp. 3–12. EDN: FMTYPH.
5. Bedford T., Cooke R. *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 393 p.
6. Eckhard R. Stanislav Ulam, John von Neumann and the Monte Carlo method. *Los Alamos Science*, 1987. No. 15. Pp. 131–137.
7. Abrahamsson M. *Treatment of uncertainty in risk based regulations and standards for risk analysis*. Lund: Lund university, 2000. Report 3116. 84 p. URL: <https://portal.research.lu.se/ws/files/5392136/1259307.pdf> (accessed: 11.08.2025)
8. Amshinov N., Vybornova O., Azhmukhamedov I. Assessment of risks of negative ecological impacts on the environment during operation of gas wells. *Proc. of 12th Computer science on-line conference «Software Engineering Research in System Science» (CSOC 2023)*; ed. by R. Silhavy, P. Silhavy. In the series «Lecture Notes in Networks and Systems» (vol. 722). Cham: Springer, 2023. Vol. 1 Pp. 712–722. DOI: 10.1007/978-3-031-35311-6_68.
9. *Kodeks Rossiyskoy Federatsii ob administrativnykh pravonarusheniyakh* [Code of the Russian Federation on Administrative Offenses]: December 30, 2001 No. 195-FZ: adopted by the State Duma on December 20, 2001: approved by the Federation Council on December 26, 2001. Information and legal portal Garant.ru. URL: <https://base.garant.ru/12125267> (accessed: August 11, 2025).
10. *Metodika ischisleniya razmera vreda, prichinnogo atmosfernomu vozdukhу kak komponentu prirodnoy sredy* [Methodology for calculating the amount of damage caused to atmospheric air as a component of the natural environment]: approved by order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the

Russian Federation dated January 28, 2021, No. 59. Information and legal portal Garant.ru. URL: <https://base.garant.ru/400289242> (accessed: August 11, 2025).

11. *Poryadok opredeleniya razmerov ushcherba ot zagryazneniya zemel' khimicheskimi veshchestvami* [The procedure for determining the amount of damage from land pollution with chemical substances]: approved by the Committee of the Russian Federation on Land Resources and Land Management on November 10, 1993 and the Ministry of Natural Resources of Russia on November 18, 1993. Electronic fund of legal and regulatory-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9033369> (accessed: August 11, 2025).
12. *Metodika ischisleniya razmera ushcherba ot zagryazneniya podzemnykh vod* [Methodology for calculating the amount of damage from groundwater pollution]: approved by order of the State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection dated February 11, 1998, No. 81. Electronic fund of legal and regulatory-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901742368> (accessed: August 11, 2025).
13. *Metodika ischisleniya razmera vreda, prichinnogo vodnym ob"ektam vsledstvie narusheniya vodnogo zakonodatel'stva* [Methodology for calculating the amount of damage caused to water bodies due to violation of water legislation]: approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated April 13, 2009, No. 87. Information and legal portal Garant.ru. URL: <https://base.garant.ru/12167365> (accessed: August 11, 2025).

Copyright © 2025 Amshinov N.M., Azhmukhamedov I.M.

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

РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРА ПО ТВЕРДОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Байков В.И., Нахай Д.М.

Цель. Экспериментально исследовать и сравнить с теоретическими расчетами кинетику растекания капли водного раствора полимера и кипяченой водопроводной воды по горизонтальной твердой поверхности.

Методы. Экспериментальные исследования.

Результаты. Опытным путем найдены: коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли на границе с воздухом; вязкость при малых скоростях сдвига жидкости и ее плотность; равновесный краевой угол. Установлено, что происходит ограниченное растекание капли до радиуса, который соответствует равновесному краевому углу. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных изменения радиуса растекания капли во времени, которое показало, что результаты качественно согласуются между собой.

Область применения исследований. Полученные результаты важны для исследования динамики процесса тушения пожара твердых материалов водными растворами полиакриламида разной концентрации.

Ключевые слова: краевой угол, равновесный краевой угол, коэффициент поверхностного натяжения, динамическая вязкость, кинематическая вязкость.

(Поступила в редакцию 25 апреля 2025 г.)

Введение

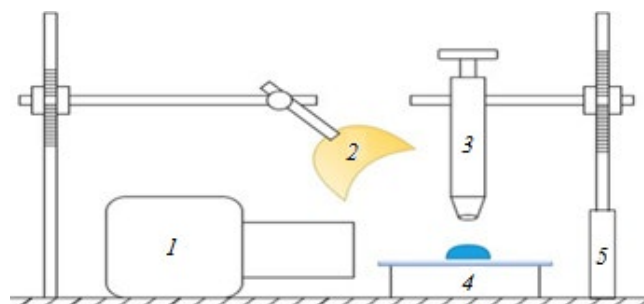
Вода является широко применяемым огнетушащим средством тушения пожаров веществ в различных агрегатных состояниях. Для повышения огнетушащих свойств воды в нее вводят поверхностно-активные вещества, применяют различного рода загустители, увеличивающие вязкость воды и одновременно повышающие адгезию, т.е. способность воды задерживаться на поверхности твердого горящего тела. Добавление в воду незначительного количества высокомолекулярных полимеров позволяет существенно сократить сопротивление транспортирующей такую воду трубопроводов.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные по кинетике растекания капли жидкости [1–3] получены для высоковязких сред, поэтому особый интерес представляет собой растекание капель маловязких жидкостей, одним из представителей которых является вода и ее растворы.

Основная часть

Экспериментальные исследования. В качестве рабочих образцов водных растворов полимера был выбран полиакриламид (синтетический полимер $(C_3H_5NO)_n$, далее – ПАМ) с массовым содержанием полимерных добавок 0,01; 0,05; 0,1 и 0,5 %, в качестве растворителя – кипяченая водопроводная вода (далее – вода).

Для исследования кинетики растекания капли воды и водного раствора полимера после ее падения на горизонтально расположенную стеклянную поверхность была создана установка, схема которой изображена на рисунке 1.



1 – высокоскоростная камера; 2 – галогеновый прожектор;
3 – пипеточный дозатор; 4 – подложка; 5 – кронштейн

Рисунок 1. – Схема рабочей установки

Установка включала высокоскоростную камеру с объективом для макросъемки Evercam 4000-32-C¹, позволяющую масштабировать процесс растекания капли и производить видеосъемку со скоростью 7047 к/с (кадров в секунду) и минимальным временем экспозиции 1 мкс с шагом 1 мкс. Для освещения процесса растекания капли, а также для качественной цветопередачи, четкого изображения и устранения мерцания видеокадров в проводимом эксперименте использовался галогеновый прожектор мощностью 1500 Вт, цветовой температурой R7s и световым потоком 3000 лм. Для выдавливания исследуемой капли на твердую горизонтальную поверхность применялся пипеточный дозатор Thermo Fischer Scientific ДПОП-1-0,5-5², жестко закрепленный в кронштейне, позволяющий устанавливать высоту падения капли. В качестве твердой поверхности использовалась стеклянная подложка. Полученный видеоматериал обрабатывался с помощью программного обеспечения EVERCAM SRV-HS.

Методика проведения эксперимента. Эксперименты проводились в изотермических условиях при температуре 23 °С.

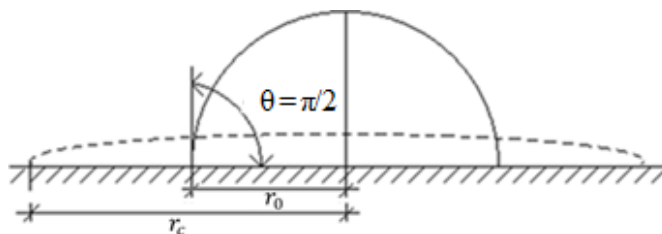
Водные растворы полимера тщательно перемешиваются в емкости и заправляются в цилиндр пипеточного дозатора. Пипеточный дозатор с помощью кронштейна координатным способом устанавливается на требуемую высоту 0,4 см над стеклянной подложкой. На поверхность подготовленной подложки (сразу после обработки этиловым спиртом и ее высушивания) выдавливается пробная капля раствора полимера, по которой осуществляется фокусировка макрообъектива видеокамеры. Для этой цели рядом с каплей устанавливается миллиметровая шкала, служащая также масштабом для оценки габаритов капли. После окончательной настройки видеокамера жестко фиксируется зажимными винтами, что позволяет соблюдать неизменность фокусного расстояния макрообъектива.

Для рассмотрения динамики растекания капли по поверхности подложки опыт выполнялся по следующему алгоритму: включается видеокамера со скоростью 7047 к/с и через 1–2 с выдавливается на подложку исследуемая капля. В момент отрыва капли от полимерного наконечника пипеточного дозатора с помощью пиксельной цифровой линейки программного обеспечения MySizee замеряется радиус падающей капли. В таблице 1 приведены результаты измеренных радиусов капли.

Таблица 1. – Радиусы капель водных растворов полимера и капли воды

Раствор	Радиус капли r_k , см
Вода	$0,151 \pm 0,002$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,151 \pm 0,002$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,140 \pm 0,002$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,139 \pm 0,002$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,136 \pm 0,002$

Момент касания капли с подложкой фиксируется видеокамерой и в течение 10 с фотографируется процесс растекания. Далее видеоматериал экспортируется и обрабатывается в программе EVERCAM SRV-HS. Продолжительность растекания капли рассматривалась с момента образования краевого угла $\theta = \pi/2$ (когда капля приобретала форму полусферы) и до полного прекращения ее растекания. На рисунке 2 представлена схема растекания капли водного раствора.



r_c – радиус предельного растекания исследуемой капли; r_0 – радиус капли при $\theta = \pi/2$

Рисунок 2. – Схема растекания капли водного раствора

¹ Высокоскоростные камеры Evercam // Evercam High speed technologies: [сайт]. – URL: <https://evercam.ru> (дата обращения: 06.04.2025).

² Дозаторы пипеточные механические Thermo Scientific. Технические характеристики // Лабораторные и весовые системы: [сайт]. – URL: <https://www.lvs.by/catalog/dosing/pipette/dozatory-mekhanicheskie-thermo-scientific-lenpipet-marka-blek307/?ysclid=m95outhqrb643271648> (дата обращения: 06.04.2025).

При конвертации пикселей в сантиметры замеренных радиусов каплей учитывалось разрешение видеокadra PPI, а также расстояние макрообъектива до места их растекания. Эксперименты повторялись минимум 5 раз для проверки воспроизводимости результатов.

Значения радиусов исследуемых каплей регистрировались с шагом экспозиции по времени 0,005 с до полного прекращения растекания. Графики зависимости радиусов каплей водных растворов ПАМ и кипяченой воды от времени представлены на рисунке 3.

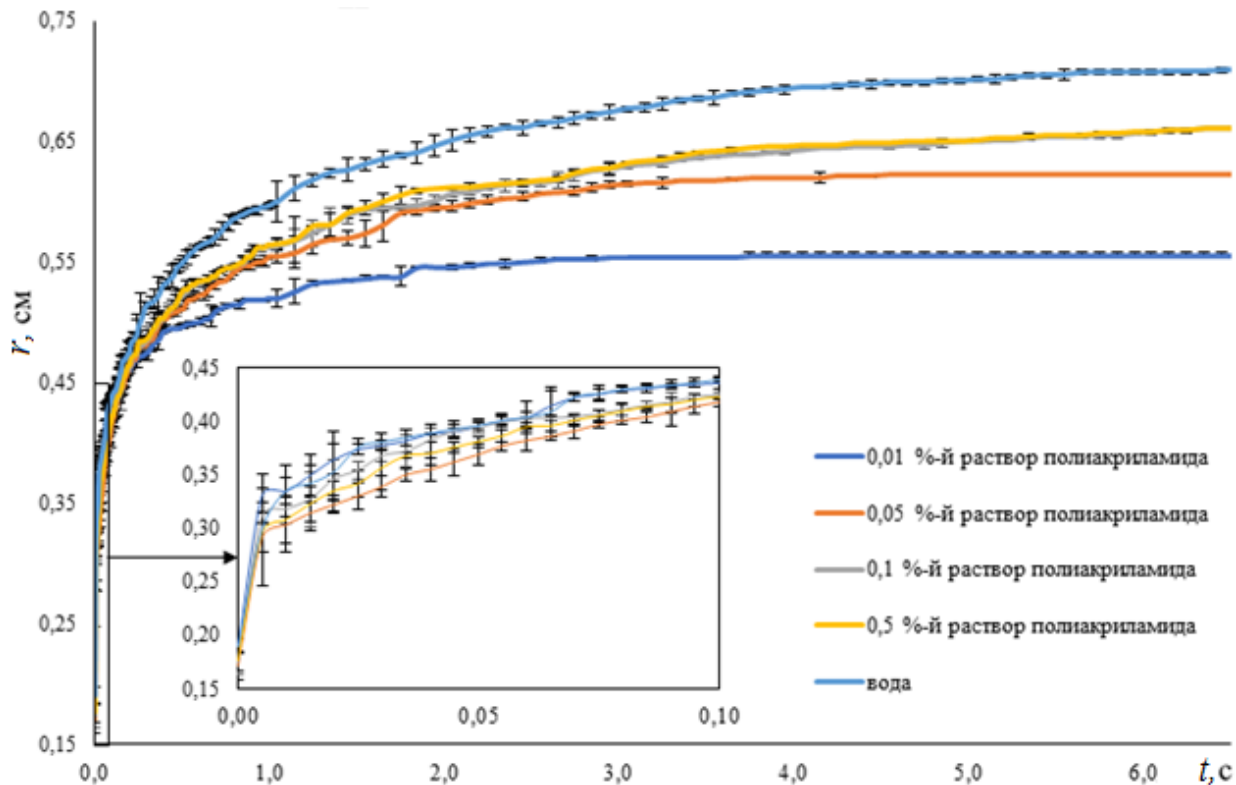
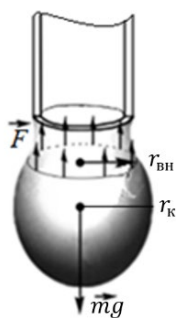


Рисунок 3. – График зависимости радиусов каплей водных растворов ПАМ и кипяченой воды от времени

Методика определения коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$. Определение коэффициента поверхностного натяжения водных растворов полимера и кипяченой воды проводилось по методу отрыва каплей из узкой вертикально расположенной трубки. Схема отрыва капли из вертикально расположенной трубки изображена на рисунке 4.



F – сила поверхностного натяжения;
 mg – сила тяжести; $r_{вн}$ – внутренний радиус полимерного наконечника дозатора пипетки; $r_к$ – радиус капли

Рисунок 4. – Схема отрыва капли из узкой вертикально расположенной трубки

В момент отрыва капли сила поверхностного натяжения F равна силе тяжести mg . Коэффициент поверхностного натяжения определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r_{вн}}, \quad (1)$$

где m – масса исследуемой капли, г;

g – ускорение свободного падения, принятое равным $979,1 \text{ см/с}^2$;

$r_{вн}$ – внутренний радиус полимерного наконечника дозатора пипетки, см.

В качестве узкой вертикально расположенной трубки в эксперименте использовался полимерный наконечник пипеточного дозатора с внутренним диаметром $D_{вн} = 0,066 \text{ см}$. Объемы каплей высчитывались исходя из радиусов исследуемых

капель $r_к$ (см), указанных в таблице 1, по формуле $V = 4\pi r_к^3 / 3$. Для определения массы исследуемой капли жидкостью плотностью ρ (г/см^3) применялась формула $m = V\rho$. Измерение

плотности каждой исследуемой жидкости замерялось вискозиметром Штабингера SVM 300 Anton Paar³. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Сведения по объему, плотности и поверхностному натяжению капель водных растворов ПАМ и капли воды

Раствор	Объем капли V , см ³	Плотность ρ , г/см ³	Поверхностное натяжение σ , г/с ²
Вода	0,0144 ± 0,0006	0,996 ± 0,002	68,2 ± 0,4
0,01 %-й раствор ПАМ	0,0144 ± 0,0006	0,997 ± 0,002	68,2 ± 0,4
0,05 %-й раствор ПАМ	0,0115 ± 0,0005	0,997 ± 0,002	54,6 ± 0,4
0,1 %-й раствор ПАМ	0,0112 ± 0,0005	0,997 ± 0,002	53,0 ± 0,4
0,5 %-й раствор ПАМ	0,0105 ± 0,0005	0,997 ± 0,002	50,0 ± 0,4

Методика определения равновесного краевого угла θ_c . Для определения равновесного краевого угла растекающейся капли жидкости применяется формула:

$$\theta_c = \frac{8}{3R_c^3}, \quad (2)$$

которая получается из уравнения (5) при малых равновесных углах θ_c , путем разложения функции $\text{tg}(\theta_c/2)$ в ряд. Здесь R_c – безразмерный радиус, который принимает капля по окончании растекания. Для его нахождения используется формула $R_c = r_c / r_0$, где $r_0 = \sqrt[3]{3V / (2\pi)}$ – радиус основания капли, имеющей форму полусферы, r_c – радиус, который принимает капля по окончании растекания. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Вычисленные параметры радиусов и равновесных краевых углов растекания капель водных растворов ПАМ и воды

Раствор	r_0 , см	r_c , см	R_c	θ_c , рад
Вода	0,190 ± 0,002	0,555 ± 0,002	2,92 ± 0,03	0,107 ± 0,004
0,01 %-й раствор ПАМ	0,190 ± 0,002	0,710 ± 0,002	3,73 ± 0,04	0,051 ± 0,002
0,05 %-й раствор ПАМ	0,176 ± 0,002	0,661 ± 0,002	3,75 ± 0,04	0,050 ± 0,002
0,1 %-й раствор ПАМ	0,174 ± 0,002	0,661 ± 0,002	3,79 ± 0,05	0,049 ± 0,002
0,5 %-й раствор ПАМ	0,171 ± 0,002	0,623 ± 0,002	3,64 ± 0,04	0,055 ± 0,002

Методика определения вязкости ν при малых скоростях сдвига жидкости и его плотности ρ . Вязкость ν при малых скоростях сдвига находилась опытным путем с помощью стеклянного капиллярного вискозиметра ВПЖ-2⁴, соответствующего ГОСТ 10028-81⁵, динамическая вязкость – вискозиметром Штабингера SVM 300 Anton Paar⁶.

Перед каждым определением кинематической вязкости жидкости для разных растворов полимера вискозиметр ВПЖ-2 был тщательно промыт и высушен. Вначале вискозиметр ВПЖ-2 несколько раз промывался бензином, затем петролейным эфиром. После растворителя промывался водой и заливался не менее чем на 5–6 ч хромовой смесью. После этого вискозиметр промывался дистиллированной водой и высушивался.

Измерение времени проводилось с помощью измерителя темпа электронного Электроника ИТ-01⁷.

Измерение кинематической вязкости с помощью капиллярного вискозиметра основано на определении времени истечения через капилляр определенного объема жидкости и измерительного резервуара.

³ Вискозиметры // СВМ ЛАБ: [сайт]. – URL: <https://svm-lab.ru/product-category/lab-equipment/viskozimetry> (дата обращения: 06.04.2025).

⁴ Вискозиметр капиллярный стеклянный ВПЖ-2. Паспорт // Сайт группы компаний «ЭКРОС». – URL: https://esohim.ru/files/project_4845/Viskozimetr_VPZH-2_pasport_print.pdf (дата обращения: 30.06.2025).

⁵ Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия: ГОСТ 10028-81. – Введ. 01.01.1983. – Москва: Межгосударственный стандарт, 2005. – 31 с.

⁶ См. сноску 3.

⁷ Индикаторы темпа электронные Электроника ИТ-01 // All-pribors.ru: Приборы и средства измерений: [сайт]. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/13029-89-elektronika-it-01-3929?ysclid=m972tda63t287668616> (дата обращения: 06.04.2025).

Кинематическая вязкость рассчитывалась согласно паспорту вискозиметра ВПЖ-2⁸ по среднему времени истечения жидкости по формуле:

$$v = \frac{g}{980,7} TK, \quad (3)$$

где $980,7 \text{ см}^2/\text{с}^2$ – размерный коэффициент;

$K = 0,3118 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}^2$ – постоянная вискозиметра;

T – время истечения жидкости, с.

Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Кинематическая и динамическая вязкость

Раствор	Кинематическая вязкость ν , Ст [в СГС] = $\text{см}^2/\text{с}$ [в СИ]	Динамическая вязкость μ	
		П [в СГС] = $\text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})$ [в СИ]	мПа·с [в СИ]
Вода	$0,0097 \pm 0,0001$	$0,00970 \pm 0,00003$	$0,970 \pm 0,003$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,0104 \pm 0,0001$	$0,01010 \pm 0,00003$	$1,010 \pm 0,003$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,0110 \pm 0,0001$	$0,01090 \pm 0,00003$	$1,090 \pm 0,003$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,0138 \pm 0,0001$	$0,01370 \pm 0,00003$	$1,370 \pm 0,003$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,0148 \pm 0,0001$	$0,01470 \pm 0,00005$	$1,470 \pm 0,003$

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. Основу теоретических расчетов кинетики растекания капли воды и водного раствора полимера выполняла система уравнений (4) и (5), полученная авторами в работе [4]:

$$\frac{dR}{d\bar{\tau}} = \left(\frac{\sin \theta - \sin \theta_c}{R} \right)^n (\cos \theta_c - \cos \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$\frac{4}{R^3} = 3 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2}, \quad \frac{4}{R_c^3} = 3 \operatorname{tg} \frac{\theta_c}{2} + \operatorname{tg}^3 \frac{\theta_c}{2}, \quad (5)$$

где $R = r_1 / r_0$, r_1 – внутренний радиус капли [4, с. 313].

Отметим, что для ньютоновских жидкостей, к которым относятся вода и рассмотренные растворы ПАМ, показатель неньютоновского поведения $n = 1$ [5, с. 8]. Кроме того, внутренний радиус капли r_1 [4] можно считать в условиях эксперимента равным радиусу растекания капли r (см). Поэтому в эксперименте уравнение (4) приняло вид

$$\frac{dR}{d\bar{\tau}} = \frac{\sin \theta - \sin \theta_c}{R} (\cos \theta_c - \cos \theta)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Расчеты проводились путем численного решения системы уравнений (6) и (5) с начальными условиями $\theta = \pi/2$, $R = 1$ при $\bar{\tau} = 0$ с учетом вычисленных в таблице 3 значений равновесных краевых углов θ_c . Безразмерные радиус R и время $\bar{\tau}$ определялись по формулам [1]:

$$R = r / r_0, \quad \bar{\tau} = \frac{2\sigma}{3\alpha\mu} \left(\frac{2\pi}{3V} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{2\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} t, \quad (7)$$

где α – безразмерный коэффициент, численное значение которого $\alpha = |\rho g / \sigma|$ [1; 4];

t – время растекания исследуемой капли, с.

Указанные начальные условия объясняются тем, что растекание капель рассматривается с момента времени $\bar{\tau} = 0$, когда образуется краевой угол $\theta = \pi/2$ и капля приобретает форму полусферы, что соответствует безразмерному радиусу растекания $R = 1$.

Численная обработка полученных результатов проводилась в пакете Mathcad. На рисунке 5 представлены графики кинетики растекания капли жидкости по твердой поверхности, полученные экспериментально и теоретически. Как видно из рисунков, теоретические и экспериментальные кривые качественно согласуются между собой. На поздних стадиях

⁸ См. сноску 4.

растекания капли, когда несущественны инерционные члены в уравнениях движения, теоретические и экспериментальные кривые хорошо согласуются между собой.

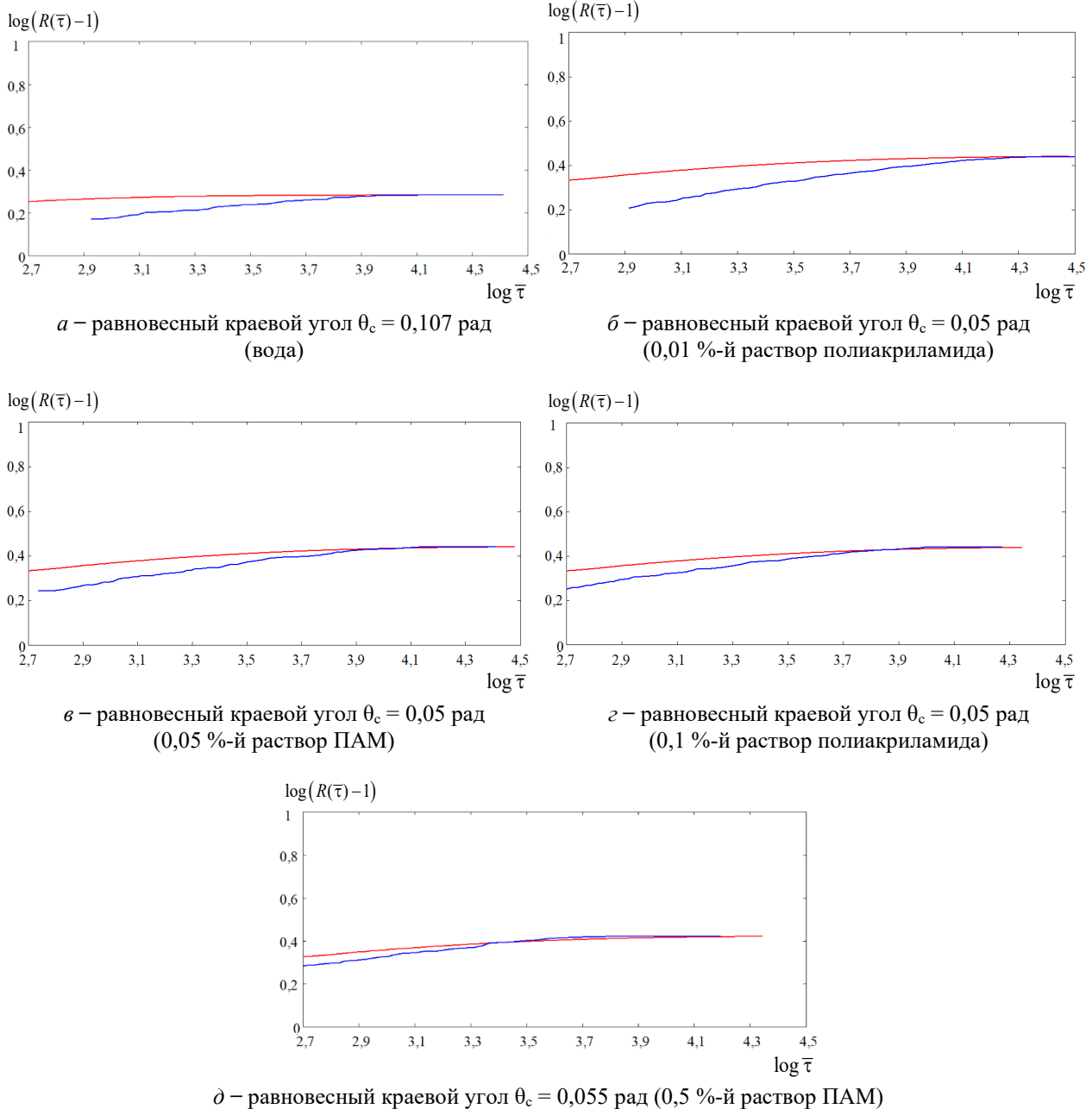


Рисунок 5. – Графики зависимости радиусов растекания капель воды и водных растворов ПАМ от времени для различных значений равновесного краевого угла θ_c по теоретическим (—) и экспериментальным (—) данным

Заключение

Таким образом, экспериментально исследована кинетика растекания капли кипящей воды и водных растворов полиакриламида по стеклянной горизонтальной поверхности. Установлено, что происходит ограниченное растекание капли до радиуса r_c , который соответствует равновесному краевому углу θ_c .

Опытным путем найдены: коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли на границе с воздухом; вязкость ν при малых скоростях сдвига жидкости и ее плотность ρ ; равновесный краевой угол θ_c . Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных по кинетике растекания капли, позволяющее сделать вывод о качественной согласо-

ванности полученных результатов. Имеющееся расхождение между кривыми на ранних стадиях растекания капли обусловлено отсутствием при теоретическом рассмотрении инерционного члена в уравнениях движения капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байков, В.И. Растекание капли жидкости по твердой горизонтальной поверхности / В.И. Байков, Е.В. Коробко, Н.А. Гончарова // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 2. – С. 38–41.
2. Вавкушевский, А.А. Растекание капли вязкой жидкости по твердой горизонтальной поверхности / А.А. Вавкушевский [и др.] // Коллоидный журнал. – 1989. – Т. 51, № 3. – С. 439–444.
3. Коробко, Е.В. Растекание капли электрореологической суспензии во внешнем поле / Е.В. Коробко, Р.Г. Городкин, В.В. Мельниченко / Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70, № 5. – С. 766–770.
4. Байков, В.И. Растекание капли неньютоновской вязкой жидкости по твердой горизонтальной поверхности / В.И. Байков, Д.М. Нахай, Д.С. Миканович // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 312–324. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.312. – EDN: JСОНЕВ.
5. Каминер, А.А. Гидромеханика в инженерной практике / А.А. Каминер, О.М. Яхно. – Киев: Техника, 1987. – 174 с.

Растекание капель воды и водных растворов полимера по твердой горизонтальной поверхности

Spreading of water droplets and aqueous polymer solutions on a solid horizontal surface

Байков Валентин Иванович

доктор технических наук, доцент

Государственное научное учреждение
«Институт тепло- и массообмена имени
А.В. Лыкова Национальной академии наук
Беларуси», лаборатория турбулентности,
главный научный сотрудник

Адрес: ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Беларусь

Email: baikov@hmti.ac.by

Valentin I. Baykov

Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

State Scientific Institution
«A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus»,
Turbulence Laboratory, Chief Researcher

Address: P. Brovki str., 15,
220072, Minsk, Belarus

Email: baikov@hmti.ac.by

ScopusID: 6602525113

Нахай Дмитрий Михайлович

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

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

Email: eurotitaner@mail.ru

Dmitriy M. Nakhay

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

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

Email: eurotitaner@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5989-5465

SPREADING OF WATER DROPLETS AND AQUEOUS POLYMER SOLUTIONS ON A SOLID HORIZONTAL SURFACE

Baykov V.I., Nakhay D.M.

Purpose. To experimentally investigate and compare with theoretical calculations the kinetics of spreading of a drop of an aqueous solution of a polymer and boiled tap water on a horizontal solid surface.

Methods. Experimental studies.

Findings. The following were found experimentally: the coefficient of surface tension of a liquid drop at the boundary with air; viscosity at low shear rates of the liquid and its density; equilibrium contact angle. It was also established that there is a limited spreading of the droplet up to a radius that corresponds to the equilibrium contact angle. A comparison of theoretical and experimental data on the change in the droplet spreading radius over time was carried out, which showed that the results are in qualitative agreement with each other.

Application field of research. The obtained results are important for studying the dynamics of the process of extinguishing fires of solid materials with aqueous solutions of polyacrylamide of different concentrations.

Keywords: contact angle, equilibrium contact angle, surface tension coefficient, dynamic viscosity, kinematic viscosity.

(The date of submitting: April 25, 2025)

REFERENCES

1. Baikov V.I., Korobko E.V., Goncharova N.A. Spreading of a liquid droplet over a solid horizontal surface. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003. Vol. 76, No. 2. Pp. 274–278. DOI: 10.1023/A:1023640831609.
2. Vavkushevskii A.A., Arslanov V.V., Stepanenko V.Yu., Ogarev V.A. Spreading of viscous liquid drop on solid horizontal surface. *Colloid Journal of the USSR*, 1989. Vol. 51, No. 3. Pp. 379–383. EDN: XOASZP.
3. Korobko E.V., Gorodkin R.G., Mel'nichenko V.V. Spreading of a drop of an electrorheological suspension in an external field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1997. Vol. 70, No. 5. Pp. 763–768. DOI: 10.1007/BF02657635.
4. Baykov V.I., Nakhay D.M., Mikanovich D.S. Rastekanie kapli nen'yutonovskoy vyazkoy zhidkosti po tverдой gorizontальной poverkhnosti [Spreading of a drop of non-Newtonian viscous liquid over a solid horizontal surface]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 312–324. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.312. EDN: JCOHEB.
5. Kaminer A.A., Yakhno O.M. *Gidromekhanika v inzhenernoy praktike* [Hydromechanics in engineering practice]. Kiev: Tekhnika, 1987. 174 p.

Copyright © 2025 Baykov V.I., Nakhay D.M.

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

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЕТРОВАЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ребко Д.В.

Цель. Системный анализ и разработка комплексного подхода к оценке вероятности возникновения ветровалов для поддержки принятия управленческих решений в области предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Методы. Исследование основано на методе системного анализа для структурирования многофакторной природы вероятности возникновения ветровалов. Для интегральной оценки применен аппарат нечеткой логики (модель Мамдани), позволяющий работать с лингвистическими переменными. Разработан программный модуль на Python, использующий методы компьютерного зрения и машинного обучения для распознавания породы деревьев и определения их биометрических параметров по фотографиям.

Результаты. Идентифицированы и классифицированы три группы факторов, влияющих на вероятность возникновения ветровалов: климатические (скорость и частота порывов ветра, осадки), географические (экспозиция местности, тип почвы, положение в массиве) и лесорастительные (устойчивость породы, высота и диаметр деревьев). Для каждой группы разработаны терм-множества. Предложена нечеткая логическая модель, интегрирующая эти факторы в единую оценку вероятности. Создан прототип программного обеспечения с графическим интерфейсом, который автоматически извлекает лесорастительные параметры из изображений и рассчитывает вероятность возникновения ветровалов.

Область применения исследований. Результаты имеют практическую значимость для Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Методика и программный модуль могут быть использованы для прогнозирования последствий штормов, планирования превентивных мероприятий и создания вероятностных карт возникновения ветровалов. Интеграция с системами мониторинга позволит создать эффективную систему раннего предупреждения и минимизации ущерба от ветровалов.

Ключевые слова: сильный ветер, повреждение леса, интегральная оценка вероятности, терм-множества, компьютерное зрение, машинное обучение, Python.

(Поступила в редакцию 3 октября 2025 г.)

Введение

Леса являются важнейшим природным ресурсом Беларуси, занимая около 40 % территории страны (порядка 8–9 млн га). Ветровалы, вызванные сильными ветрами, представляют серьезную угрозу для лесных экосистем и жизнедеятельности человека. Сильный ветер является одной из основных причин повреждения лесов в мире. Так, в Европе на долю ветра приходится более половины ущерба лесным массивам от всех факторов [1]. Беларусь не является исключением: периодически через территорию республики проходят мощные циклонные штормы, способные в кратчайшие сроки повредить огромные массивы леса. К примеру, ураган, который прошел 12–13 июля 2016 г., вызвал крупнейший в истории страны ветровал: было повалено около 4,6 млн м³ древесины на площади около 40,4 тыс. га. В 2022 г. последствия серии ураганов затронули суммарно около 90 тыс. га лесов Беларуси¹. В июле 2024 г. сильный ветер привел к гибели шестерых человек и повреждению лесов на площади свыше 41 тыс. га². Последний масштабный случай произошел в июле 2025 г., когда в результате ветровала погиб один человек, четверо (включая ребенка) получили травмы и были госпитализированы. Сильным ветром были повреждены лесные массивы на площади

¹ Друк, М. В Могилевской области планируют высадить 640 га новых лесов на месте поврежденных ветровалами / М. Друк // Беларусь сегодня: SB.BY: [сайт]. – 2022. – 6 окт. – URL: <https://www.sb.by/articles/nalomalonenalo-drov.html> (дата обращения: 07.05.2025).

² Лукашенко поручил за будущий год восстановить лесонасаждения на пострадавших от стихии территориях // Полоцкий районный исполнительный комитет: [сайт]. – 2024. – 2 авг. – URL: <https://polotsk.vitebsk-region.gov.by/ru/novosti/respublikanskije-novosti/item/13654-lukashenko-poruchil-za-budushchij-god-vostranovit-lesonasazhdeniya-na-postradavshikh-ot-stikhii-territoriyakh> (дата обращения: 07.05.2025).

около 1,7 тыс. га³. Подобные чрезвычайные ситуации наносят значительный экономический ущерб (утрата товарной древесины, затраты на ликвидацию последствий), экологический вред (разрушение местообитаний, повышенный риск вспышек вредителей в поваленных древесных остатках) и требуют больших усилий для восстановления лесов.

Для смягчения последствий воздействия сильных ветров на лесные массивы актуальна задача анализа факторов вероятности повреждения лесных массивов под воздействием сильного ветра. Выявление участков леса, наиболее уязвимых к воздействию сильного ветра, позволит заблаговременно принимать профилактические меры, например планировать выборочные санитарные рубки перезревших и неустойчивых лесных насаждений до того, как они пострадают от воздействия ветра, оптимизировать схемы лесопосадок с учетом розы ветров, создавать ветрозащитные полосы и т.д. Современные информационные технологии дают новые возможности для мониторинга состояния лесов и автоматизированной оценки рисков. В данной работе выполнен системный анализ факторов, определяющих ветроустойчивость лесных насаждений, и разработан подход к интегральной оценке вероятности возникновения ветровала с применением аппарата нечеткой логики. Предлагаемый подход способен учитывать комплекс климатических, географических и лесорастительных факторов конкретной территории, что обеспечивает более точную оценку вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра по сравнению с учетом какого-либо одного фактора (например, только скорости ветра). Кроме того, разработан прототип программного средства на языке Python, использующего методы компьютерного зрения и машинного обучения для автоматизации сбора данных о лесорастительных факторах и расчета вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра.






Основная часть

1. Системный анализ факторов вероятности возникновения ветровалов. Возникновение ветровалов обусловлено сочетанием множества причин, которые условно можно разделить на три группы: климатические факторы, географические факторы и лесорастительные факторы. Такой подход согласуется с существующими моделями анализа рисков: в частности, отмечается, что на ветровую устойчивость влияют погодные, почвенно-рельефные условия и характеристики древостоев [1]. Ниже приведена классификация основных факторов вероятности по указанным группам.

1.1. Климатические факторы (множество С). Главным непосредственным вероятностным фактором является скорость ветра во время опасных метеорологических явлений, особенно максимальная скорость порывов. Ветер с порывами свыше 25–30 м/с способен вызывать массовые повреждения деревьев практически при любых условиях. Именно максимальная скорость порывов, а не средняя скорость ветра, во многом определяет масштабы последствий ветровала, поэтому при анализе вероятности его возникновения учитывается показатель «максимальная скорость порыва ветра (V_{max})». Другим важным параметром является частота возникновения сильных ветров, а именно как часто в данном регионе или локальной местности происходят эпизоды с порывами сильного ветра. Например, одни районы могут регулярно подвергаться ураганам ветрам (несколько раз в год), тогда как в других сильные ветра случаются раз в несколько лет. Третьим климатическим фактором можно считать предшествующие сильному ветру осадки. Обильный дождь приводит к переувлажнению почвы и снижению устойчивости корневой системы к вывалу, вследствие чего даже сравнительно менее сильный ветер может повредить лесные массивы. Таким образом, продолжительные дожди перед сильными ветрами повышают вероятность возникновения ветровала. В рамках системного анализа каждому из перечисленных климатических факторов сопоставлены лингвистические градации (термы). Например, значения максимальной скорости порывов ветра разделяется на уровни: умеренная, сильная, экстремальная; частота возникновения сильных ветров может характеризоваться как низкая, средняя и высокая и т.п. Такая градация позволяет описывать погодные условия в понятных специалисту категориях. Климатические факторы вероятности возникновения ветровала представлены в таблице 1.










³ Иванова, К. Как выглядит сломанный и поваленный лес после страшного урагана в Беларуси: фото и видео / К. Иванова // Комсомольская правда: [сайт]. – 2025. – 11 июль. – URL: <https://www.belarus.kp.ru/daily/27724/5113231/> (дата обращения: 10.09.2025).

Таблица 1. – Климатические факторы вероятности возникновения ветровала

Фактор	Терм-множество		
C_1 – максимальная скорость порывов ветра	 умеренная	 сильная	 экстремальная
C_2 – частота возникновения сильных ветров	 низкая	 средняя	 высокая
C_3 – предшествующие осадки	 отсутствуют	 умеренные	 обильные

1.2. Географические факторы местности (множество G). Существенную роль играет рельеф и экспозиция местности относительно преобладающих ветров. На открытых возвышенных участках ветровая нагрузка выше, тогда как в низинах или за холмами лесные массивы могут быть частично защищены от воздействия сильного ветра. Например, исследования показывают [1], что сложный гористый или холмистый рельеф может увеличивать скорость порывов ветер за счет эффекта сложения потоков и ускорения их на вершинах холмов и, соответственно, вероятность возникновения ветровалов увеличивается. Хотя территория Беларуси преимущественно равнинная, локальные географические особенности местности (например, возвышенности Минской и Витебской областей) могут несколько влиять на ветровую нагрузку. Другой фактор – тип и влажность почв. Глубина распространения корней сильно зависит от почвенных условий: на хорошо дренированных, сухих почвах деревья формируют глубокую корневую систему, тогда как на глееватых и торфяных грунтах корни развиваются преимущественно в поверхностном слое из-за высокого уровня грунтовых вод. Соответственно, на переувлажненных почвах устойчивость деревьев к вывалу ниже. Так, по результатам исследований в Ирландии установлено [1], что ветровалы еловых насаждений чаще происходят на заболоченных (торфяных) почвах, чем на сухих бурых. К географическим факторам также можно отнести положение лесного массива относительно открытых пространств местности. Лесные насаждения, расположенные внутри большого массива (в глубине лесного массива), менее подвержены ветровому воздействию, поскольку окружены другими деревьями и защищены с краев. Напротив, опушки леса и отдельные изолированные участки леса испытывают прямое воздействие ветровой нагрузки и часто сильнее повреждаются при возникновении опасных метеорологических явлений. Более того, если сплошной лесной массив приобретает новую открытую границу (например, после вырубке соседнего участка леса или создания просеки), деревья, росшие внутри массива, внезапно оказываются на его краю и не адаптированы к ветровой нагрузке, что делает их особенно уязвимыми к воздействию ветровой нагрузки. В связи с этим для оценки вероятности возникновения ветровала учитывается фактор положения лесного насаждения: внутримассивное (защищенное), краевое или изолированное. Географические факторы местности также оформлены в виде термов (табл. 2).

Таблица 2. – Географические факторы местности

Фактор	Терм-множество		
G_1 – экспозиция местности	 низкая	 средняя	 высокая
G_2 – водопроницаемость почвы	 хорошая	 удовлетворительная	 плохая
G_3 – положение лесного массива	 внутримассивное	 краевое	 изолированное

1.3. Лесорастительные факторы (множество F). Важнейшие характеристики, определяющие устойчивость конкретного лесного массива к воздействию сильного ветра – это видовой состав, возраст и размеры деревьев. Глубина и характер корневой системы, прочность ствола, плотность древесины и даже наличие листвы в период опасного метеорологического явления – все это влияет на вероятность повреждения дерева. Как правило, хвойные породы менее устойчивы к воздействию ветровой нагрузки, чем лиственные, особенно в зимний период: хвойные деревья (например, ели) сохраняют хвою и имеют одинаковую площадь кроны круглый год, тогда как лиственные (береза, дуб и др.) в зимнее время без листвы и вероятность повреждения лиственных лесов зимой минимальна. Кроме того, у еловых деревьев неглубокая корневая система, что делает их менее устойчивыми к воздействию ветра, тогда как, например, сосна формирует более глубокий стержневой корень. В целом ель обыкновенная считается самой неустойчивой к сильному ветру породой в белорусских лесах (высокая вероятность ветровала), сосна и большинство лиственных пород более устойчивы (средняя или низкая вероятность повреждений).

Другим ключевым фактором является высота и возраст деревьев в лесном массиве. Чем выше располагается крона дерева, тем меньше устойчивость лесных массивов к воздействию сильного ветра, особенно если деревья при этом имеют сравнительно тонкие стволы. Показателем устойчивости служит отношение высоты дерева H к диаметру его ствола D (H/D – стройность дерева). Для хвойных лесных массивов критическим считается значение стройности дерева 80 (при превышении этого порога вероятность вывала дерева с корнем очень высокая) [1]. В густых одноярусных лесах при конкуренции за свет деревья вырастают высокими и стройными, что увеличивает значение отношения H/D и снижает устойчивость к воздействию ветра. В более разреженных или прошедших своевременное прореживание лесах деревья, как правило, имеют больший диаметр и более низкую крону, что значительно увеличивает устойчивость к ветровой нагрузке.

Стоит отметить, что режим хозяйственных мероприятий также влияет на устойчивость лесных массивов: запоздалое или чрезмерное проведение прореживаний может временно повысить вероятность возникновения ветровала, тогда как грамотное постепенное прореживание с молодого возраста способствует развитию прочной корневой системы и снижает уязвимость лесных насаждений к воздействию ветра. К лесорастительным факторам относятся: доминирующая порода, средняя высота деревьев, средний диаметр стволов и форма кроны. Каждому из этих факторов также соответствуют лингвистические градации (термы). К примеру, средняя высота деревьев классифицируется как низкая (молодняки до 10 м), средняя (полувозрастной лес 10–20 м) или высокая (спелый лес более 20 м). Средний диаметр стволов может быть разделен на категории: тонкий, средний и большой.

Для формы кроны также можно ввести градации (узкая, средняя, широкая), отражающие степень сомкнутости и разветвленности кроны. Что касается классификации фактора устойчивости доминирующей породы (высокая, средняя, низкая) критерии могут быть уточнены на основе ранее проведенных исследований коэффициента β [2; 3; 4], отражающего аэродинамическое сопротивление кроны. Согласно работам [2; 5], для ели обыкновенной β достигает 70–75 кг/(м \times с), что указывает на ее низкую устойчивость к воздействию ветра. Для сосны обыкновенной характерны значения β порядка 50–65 кг/(м \times с), что позволяет отнести ее к категории средней устойчивости. Лиственные породы (береза, дуб, осина), имеющие более низкие значения β (<50 кг/(м \times с)), могут быть отнесены к категории высокой устойчивости [6]. Таким образом, коэффициент β обеспечивает количественное основание для термовой классификации фактора доминирующей породы, сохраняя при этом удобство лингвистических категорий (табл. 3).

Таблица 3. – Лесорастительные факторы

Фактор	Терм-множество		
	низкая	средняя	высокая
F_1 – устойчивость доминирующей породы деревьев	низкая	средняя	высокая
F_2 – средняя высота деревьев	низкая	средняя	высокая
F_3 – средний диаметр стволов деревьев	малый	средний	большой
F_4 – средняя ширина кроны деревьев	малая	средняя	большая

При разработке терм-множеств учитывалось, что лицо, принимающее решения, не обязательно обладает познаниями в области информационных технологий или математиче-

ского моделирования, поэтому критерии должны быть представлены в удобной форме. Использование терм-множеств (лингвистических категорий) для описания факторов позволяет экспертам и практикам работать с системой на естественном языке, не погружаясь в числовые детали. Подобный подход ранее был успешно применен при оценке пожарной опасности лесов с помощью нечетких моделей [7].

2. Интегральная оценка вероятности. Определив ключевые факторы вероятности повреждения лесных массивов под воздействием сильного ветра и задав систему критериев, необходимо интегрировать их в единый показатель – интегральную оценку вероятности возникновения ветровала для данного участка леса. В настоящем исследовании в основу расчетов положена модель Мамдани [8], в которой входными переменными служат значения факторов $C_1, \dots, C_3, G_1, \dots, G_3, F_1, \dots, F_4$ в термовой форме, а выходной переменной – вероятность возникновения ветровала P . Структура системы факторов с термами представлена на рисунке 1.

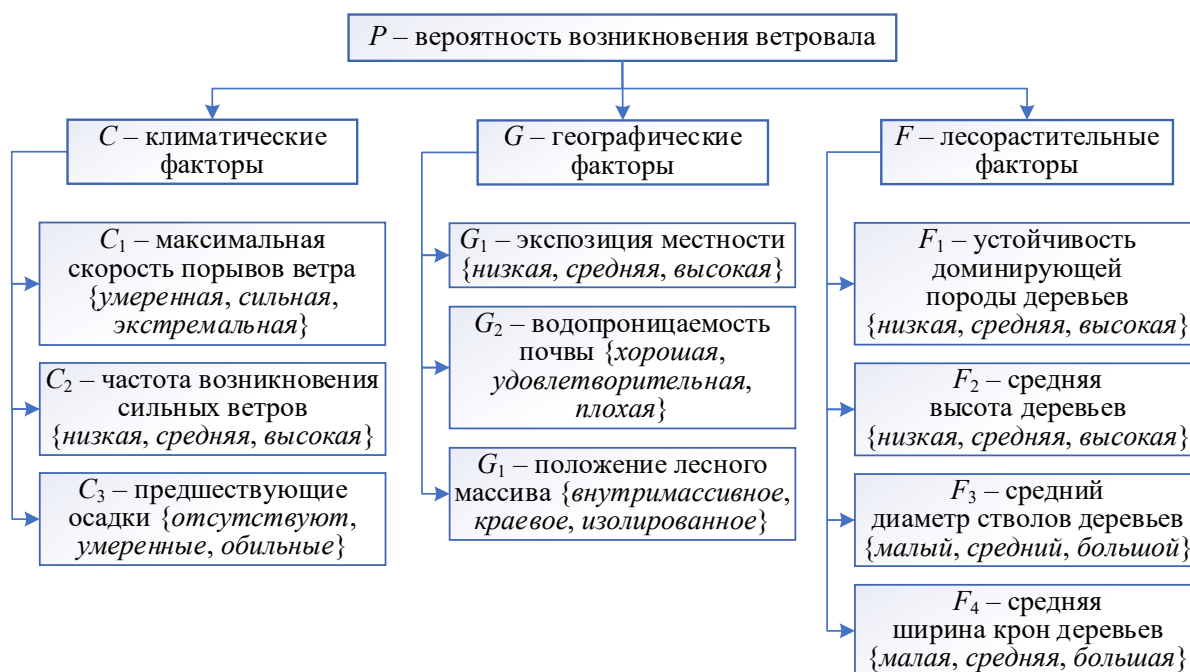


Рисунок 1. – Структура системы факторов

Прямое использование всех факторов одновременно представляет многокритериальную задачу, решение которой можно реализовать методами нечеткой логики:

$$f_{\text{ветр}} = \langle C, G, F \rangle.$$

Для каждого входного фактора определены функции принадлежности к заданным лингвистическим термам. Для количественных факторов устанавливаются нечеткие границы. То есть границы таких термов могут перекрываться, например, некоторое фактическое значение скорости ветра одновременно может относиться к нескольким термам с разной степенью принадлежности. Качественные факторы (например, положение на краю массива) могут быть представлены бинарными или тернарными логическими переменными.

На основе знаний экспертов в области чрезвычайных ситуаций и анализа данных о произошедших на территории Республики Беларусь случаях ветровалов формируется база правил нечеткой логики по форме «Если ... То ...». Правила формируются для каждой группы факторов и для вероятности возникновения ветровала. Например:

Если C_1 = “экстремальная”
 Или (C_1 = “сильная” И C_2 = “высокая”)
 Или (C_1 = “сильная” И C_3 = “обильные”)
 То C := “высокий”.

Для вероятности возникновения ветровала P :

Если C = “высокий” И (G = “высокий” Или F = “высокий”)
 То P := “очень высокая”.

Для каждого правила определяется степень активации, а по группам правил проводится агрегация. После дефазификации получаем итоговый результат интегральной оценки вероятности возникновения ветровалов P в виде числового индекса или в виде лингвистической оценки («низкая», «повышенная», «высокая», «очень высокая» вероятность возникновения ветровалов).

На основании предложенной методики оценки вероятности может быть реализована шкала ветроопасности лесов. В отличие от тривиальных индикаторов (например, предупреждений по критическому значению максимальной скорости порывов ветра) интегральная оценка учитывает широкий контекст факторов. Так, для двух разных участков леса при одинаковом прогнозируемом значении максимальной скорости порывов ветра вероятность возникновения ветровалов может отличаться: он будет выше там, где неблагоприятные географические и лесорастительные факторы (например, заболоченный ельник на опушке), и ниже там, где условия более благоприятные (например, сосновый лес на сухой почве внутри большого лесного массива). Методика оценки вероятности может быть использована в деятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь как элемент системы поддержки принятия управленческих решений. Она позволит дополнять сведения Белгидромета при подготовке штормовых предупреждений, акцентируя внимание на наиболее уязвимых участках лесного фонда и обеспечивая более адресное информирование органов местного управления и населения. Кроме того, данная методика оценки вероятности возникновения ветровала позволит своевременно определять приоритетные направления лесозащитных мероприятий: выделять кварталы для первоочередного обследования, зоны для усиленного мониторинга и территории, где требуется проведение профилактических рубок.

3. Программный модуль оценки вероятности возникновения ветровала. Для практического внедрения описанного подхода по оценке вероятности возникновения ветровала разработан прототип программного модуля, позволяющего автоматизировать сбор данных о группах факторов и рассчитывать вероятность повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра. Программный модуль реализован на языке Python и включает два основных компонента: подсистему компьютерного зрения с возможностью машинного обучения для анализа фотографий деревьев и лесных массивов и подсистему оценки интегральной вероятности на основе введенных факторов.

3.1. Подсистема компьютерного зрения. Данная часть использует методы машинного обучения (глубокие нейронные сети) для распознавания лесорастительных факторов деревьев по их изображениям. В разработке используется библиотека OpenCV и фреймворк глубокого обучения (TensorFlow/PyTorch). Алгоритм работы следующий: цифровое изображение дерева (или участка леса) поступает на вход программы, где сначала выполняется детекция отдельных деревьев и сегментация силуэтов ствола и кроны. Затем с помощью обученной сверточной нейронной сети производится классификация породы дерева: определяется вид/порода (например, сосна, ель, береза и т.д.) по характерным визуальным признакам коры, кроны, листьев/хвои. Модель оценивает геометрические параметры: высоту дерева, диаметр ствола и ширину кроны. Для измерения абсолютной высоты по одиночной фотографии используется предварительная калибровка: например, применяются стереофотограмметрические методы либо известные линейные ориентиры (рост человека на фото, лазерный дальномер и пр.). В нашем прототипе для упрощения предполагалось, что съемка ведется на стандартизированной высоте – 1,5 м, что позволило калибровать масштаб изображения. Выделив ствол на фото, алгоритм оценивает его диаметр на уровне груди на основе количества пикселей и известного расстояния до дерева. Ширина кроны определяется по границам сегментированной кроны. Точность определения физических параметров проверялась на контрольных деревьях, для которых были доступны лазерные измерения – средняя ошибка составила порядка 10–15 %.

3.2. Подсистема определения вероятности. Информация, извлеченная из изображения (порода, высота, диаметр ствола, ширина кроны), конвертируется в формат входных факторов модели определения вероятности. Так, порода сопоставляется с фактором F_1 (например, выявлено «ель» – низкая устойчивость доминирующей породы), измеренная высота – с фактором F_2 (например, 25 м – высокая средняя высота деревьев) и т.д. Дополнительно модуль может принимать внешние данные: координаты участка (для определения географических факторов местности G) и текущие/прогнозные метеоданные (для климатических факторов вероятности возникновения ветровала C). Координаты позволяют автоматически получить сведения о рельефе (высота над уровнем моря, открытость местности)

и типе почв из геоинформационных слоев. Метеоданные (например, прогноз максимальной скорости порывов ветра на ближайшие дни) загружаются через API⁴ погодных служб либо из архивов наблюдений. Все эти параметры поступают на вход подсистемы интегральной оценки вероятности, реализованной согласно описанной нечеткой модели. Модуль выполняет нечеткий логический вывод или расчет вероятности P и выдает результат пользователю.

3.3. Интерфейс и использование программного модуля. Программа представляет собой приложение с графическим интерфейсом. Пользователь может загрузить фотографию дерева или лесного участка, указать местоположение и дату (для привязки метеоусловий), после чего система отображает распознанные характеристики деревьев (например: «порода: сосна обыкновенная; высота ~15 м; диаметр ствола ~0,64 м; ширина кроны ~3,2 м») (рис. 2).



Рисунок 2. – Интерфейс программного модуля

Вероятность возникновения ветровала выводится в форме цветовой индикации и текстового описания, например: «Вероятность возникновения высокая (вероятность ветровала при сильном ветре ~70 %)». Подобный инструмент может найти широкое применение в деятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. При оперативном реагировании на штормовые предупреждения специалисты МЧС смогут использовать автоматизированную оценку вероятности возникновения ветровала для прогнозирования возможных зон повреждений лесов и организации превентивных мер. Модуль может быть интегрирован с беспилотными летательными аппаратами, которые способны собирать большое количество снимков лесных массивов, после чего программа автоматически вычисляет показатели устойчивости лесонасаждений к воздействию ветра. Это позволит формировать оперативные карты вероятности возникновения ветровала и заблаговременно планировать защитные мероприятия. Таким образом, реализуется система мониторинга вероятности возникновения ветровалов в масштабах региона, что повышает эффективность управления и минимизирует последствия метеорологических опасных явлений.

В настоящее время разработанный программный модуль проходит тестирование на ограниченной выборке данных. Разрабатываются методы улучшения точности распознавания (например, учет сезонных изменений внешнего вида деревьев, добавление снимков в инфракрасном диапазоне для оценки состояния здоровья деревьев). Планируется также внедрение функции автообновления факторов вероятности при поступлении новых данных, например ежесуточное обновление погодных условий из открытых источников и пополнение базы данных ранее зарегистрированных ветровалов.

⁴ API – Application Programming Interface (программный интерфейс приложения).

Заключение

Сильные ветры представляют значительную опасность для лесов Беларуси, о чем свидетельствуют случаи массовых ветровалов в последние годы. Проведенный системный анализ вероятности повреждения деревьев от воздействия ветра позволил выявить совокупность ключевых факторов, определяющих уязвимость лесных насаждений: от климатических параметров до свойств конкретных лесных насаждений и условий их произрастания.

Разработана методика интегральной оценки вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра (ветровалов), отличающаяся применением нечеткой логической модели, учитывающей разнообразные факторы (географические, климатические, лесорастительные), для которых предложена многоуровневая градация в виде терм-множеств, и использующей понятные лингвистические категории (низкий, средний, высокий и т.д.). Предложенная методика позволяет проводить прогнозирование последствий опасных метеорологических явлений, сопровождающихся возникновением сильного ветра, для лесонасаждений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения интегральной оценки вероятности возникновения ветровалов Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Для МЧС точная оценка вероятности возникновения ветровала имеет большое значение при планировании мер гражданской защиты: заблаговременном прогнозировании последствий опасных метеорологических явлений, оперативной локализации завалов, организации безопасных маршрутов эвакуации, а также предупреждении техногенных аварий вследствие повреждения инфраструктуры в лесных массивах. Таким образом, разработанные методы оценки вероятности возникновения ветровалов могут служить элементом интегрированной системы предупреждения и минимизации чрезвычайных ситуаций природного характера.

Предложенная методика может дополнять существующие системы мониторинга: как показано, она имеет потенциал интеграции с автоматизированными средствами сбора данных (дроны, камеры) и с метеорологическими предупреждениями.

Разработка программного модуля на Python с использованием компьютерного зрения и методов машинного обучения демонстрирует, как цифровые инструменты могут помочь в автоматизации оценки вероятности повреждения лесов сильным ветром. Хотя представленный модуль находится на стадии прототипа, его дальнейшее развитие позволит создать полнофункциональную систему поддержки принятия решений в области управления и реагирования на чрезвычайные ситуации природного характера, связанные с воздействием сильного ветра на лесные массивы.

В перспективе планируется расширение базы знаний модели за счет накопления данных о фактически произошедших ветровалах и условиях их возникновения. Это позволит откорректировать функции принадлежности факторов и уточнить правила нечеткого вывода, повышая точность прогноза. Также важно учитывать возможное усиление экстремальных погодных явлений в связи с изменением климата – интегральная оценка может быть адаптирована под различные климатические сценарии. Таким образом, сочетание системного анализа, современных данных наблюдений и инструментов машинного обучения открывает путь к более устойчивому и адаптивному управлению принятием решений в условиях опасных метеорологических явлений, связанных с воздействием сильного ветра на лесные массивы Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dhubháin, Áine. Understanding and managing windthrow / Áine Dhubháin, Niall Farrelly // COFORD Connects. Silviculture and Forest Management. – 2018. – No. 23. – 4 p. – URL: <https://coford.ie/media/coford/content/publications/2018/SM23ManagingWindthrow160418.pdf> (date of access: 07.05.2025).
2. Borisevich, S.A. Drag relationships for full-grown Scots pine trees / S.A. Borisevich, A.N. Kamluk, D.V. Rebko // Canadian Journal of Forest Research. – 2022. – Vol. 52, No. 5. – P. 882–887. – DOI: 10.1139/cjfr-2021-0043.
3. Borisevich, S.A. Evaluation of the drag coefficients of tree crowns by numerical modeling of their free fall / S.A. Borisevich, V.S. Vikhrenko // Agricultural and Forest Meteorology. – 2018. – Vol. 256-257. – P. 346–352. – DOI 10.1016/j.agrformet.2018.03.020. – EDN: YBHOPJ.
4. Борисевич, С.А. Определение сопротивления движению кроны дерева / С.А. Борисевич, А.Н. Камлюк, Д.В. Ребко // Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика. – 2013. – № 6 (162). – С. 34–36. – EDN: TKARSZ.

5. Орлов, С.А. Исследование коэффициента сопротивления элементов кроны кедровой сосны / С.А. Орлов, Л.А. Шрагер // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2 (14). – С. 103–110. – EDN: NUXVEN.
6. Gardiner, B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage / B. Gardiner, P. Berry, B. Moulia // Plant Science. – 2016. – Vol. 245. – P. 94–118. – DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.01.006.
7. Иванов, С.А. Системный анализ факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров в Северо-Западном федеральном округе / С.А. Иванов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 26–34. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34. – EDN: СМТСРН.
8. Баданина, Н.Д. Интегрирование модуля нечеткого логического вывода с помощью веб-технологий / Н.Д. Баданина, А.А. Зинченко, В.А. Судаков // Научный сервис в сети Интернет: труды XXV Всероссийской научной конференции, Москва, 18–21 сент. 2023 г., онлайн. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2023. – С. 62–73. – DOI: 10.20948/abrau-2023-5. – EDN: FLWBON.

Анализ вероятности возникновения ветровалов на территории Республики Беларусь
Analysis of the probability of windfall occurrence on the territory
of the Republic of Belarus

Ребко Дмитрий Вячеславович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
ликвидации чрезвычайных ситуаций,
старший преподаватель

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

Email: rebko.dmitriy@yandex.ru

Dmitriy V. Rebko

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

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

Email: rebko.dmitriy@yandex.ru

ORCID: 0009-0009-6347-5170

ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF WINDFALL OCCURRENCE ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Rebko D.V.

Purpose. Systems analysis and development of an integrated approach to assessing the likelihood of windfalls to support management decision-making in the field of emergency prevention.

Methods. The study is based on the method of systems analysis to structure the multifactorial nature of the probability of windfall occurrence. Fuzzy logic (the Mamdani model) was used for the integrated assessment, allowing for processing of linguistic variables. A Python software module was developed that utilizes computer vision and machine learning methods to recognize tree species and determine their biometric parameters from photographs.

Findings. Three groups of factors influencing the probability of windfalls have been identified and classified: climatic (speed and frequency of wind gusts, precipitation), geographical (terrain exposure, soil type, position in the massif) and forest vegetation (stability of the species, height and diameter of trees). Term sets were developed for each group. A fuzzy logic model was proposed that integrates these factors into a single probability estimate. A software prototype with a graphical interface has been created that automatically extracts forest vegetation parameters from images and calculates the probability of windfalls.

Application field of research. The results have practical significance for the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. The methodology and software module can be used to forecast storm impacts, plan preventive measures, and create probability maps of windfalls occurrence. Integration with monitoring systems will enable the creation of an effective early warning system and minimization of damage from windfalls.

Keywords: strong wind, forest damage, integral probability estimation, term sets, computer vision, machine learning, Python.

(The date of submitting: October 3, 2025)

REFERENCES

1. Dhubháin Áine, Farrelly Niall. Understanding and managing windthrow. *COFORD Connects. Silviculture and Forest Management*, 2018. No. 23. 4 p. URL: <https://coford.ie/media/coford/content/publications/2018/SM23ManagingWindthrow160418.pdf> (date of access: 07.05.2025).
2. Borisevich S.A., Kamluk A.N., Rebko D.V. Drag relationships for full-grown Scots pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022. Vol. 52, No. 5. Pp. 882–887. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0043.
3. Borisevich S.A., Vikhrenko V.S. Evaluation of the drag coefficients of tree crowns by numerical modeling of their free fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018. Vol. 256-257. Pp. 346–352. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.03.020. EDN: YBHOPJ.
4. Borisevich S.A., Kamluk A.N., Rebko D.V. Opredelenie soprotivleniya dvizheniyu krony dereva [Determination of the resistance of the moving tree crown]. *Proceedings of BSTU. Series 6. Physical and Mathematical Sciences and Informatics*, 2013. No. 6 (162). Pp. 34–36. (rus). EDN: TKARSZ.
5. Orlov S.A., Shrager L.A. Issledovanie koeffitsienta soprotivleniya elementov krony kedrovoy sosny [Research of the resistance coefficient of cedar pine crown elements]. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2011. No. 2 (14). Pp. 103–110. (rus). EDN: NUXVEN.
6. Gardiner B., Berry P., Moulia B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 2016. Vol. 245. Pp. 94–118. DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.01.006.
7. Ivanov S.A. Sistemnyy analiz faktorov, vliyayushchikh na vzniknoenie lesnykh pozharov v Severo-Zapadnom federal'nom okruge [Systems analysis of factors causing forest fires in Northwestern Federal District]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2022. No. 4. Pp. 26–34. (rus). DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34. EDN: CMTCPH.
8. Badanina N.D., Zinchenko A.A., Sudakov V.A. Integrirovaniye modulya nechetkogo logicheskogo vyvoda s pomoshch'yu veb-tekhnologiy [Integration of fuzzy inference module using web technologies]. *Proc. of XXV All-Russian scientific conf. «Scientific Services & Internet», Moscow, September 18–21, 2023, online*. Moscow: Institute of Applied Mathematics named after. M.V. Keldysh, 2023. Pp. 62–73. (rus). DOI: 10.20948/abrau-2023-5. EDN: FLWBON.

Copyright © 2025 Rebko D.V.

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВОДОЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Миканович Д.С., Курский И.А., Казутин Е.Г.

Цель. Провести анализ статистических данных аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях, оценить их основные причины и последствия, сформулировать тематику для будущих исследований в области прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях.

Методы. Теоретический анализ.

Результаты. Проведен анализ аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях водоемов технического назначения, изучены ранее проводимые исследования в области прогнозирования аварий на ограждающих конструкциях водоемов технического назначения, определена область научных интересов в части дальнейших исследований по прогнозированию и предупреждению чрезвычайных ситуаций, оценке устойчивости ограждающих конструкций водоемов технического назначения, разработки системы компенсирующих мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций на сооружениях данного типа.

Область применения исследований. Анализ аварий на гидротехнических сооружениях водоемов технического назначения позволит заложить основу для будущих исследований по разработке системы компенсирующих мер для предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций на водоемах технического назначения, «остановки» аварий на начальных этапах, а также для снижения последствий при возникновении подобных ситуаций.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, плотина, дамба, водоемы технического назначения, очистные сооружения, авария, коэффициент фильтрации, поверхностно-активные вещества, система компенсирующих мероприятий.

(Поступила в редакцию 6 мая 2025 г.)

Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) являются неотъемлемой частью современной цивилизации, обеспечивая нас водой, электроэнергией, защитой от наводнений и создавая предпосылки для развития ключевых отраслей экономики, таких как сельское хозяйство, промышленность и транспорт. Однако аварии на ГТС могут иметь катастрофические последствия, оказывающие негативное влияние на окружающую среду и социально-экономическую стабильность.

Сбои в работе ГТС несут угрозу масштабных и многогранных разрушений, затрагивающих все аспекты жизни общества. Самым печальным последствием таких аварий становятся человеческие жертвы. Социальные последствия включают массовую эвакуацию, а также потерю имущества и необходимость переселения.

Последствия экономического ущерба ощущаются в колоссальных расходах на устранение разрушений – реконструкцию поврежденных дорог, мостов, энергетических инфраструктур и жилых строений.

Восстановление после таких аварий занимает годы, а некоторые экосистемы не возвращаются к исходному состоянию никогда, что делает профилактику и модернизацию ГТС критически важной задачей для глобальной безопасности.

Основная часть

Точное количество гидротехнических сооружений в мире оценить сложно. По данным Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD), в мире насчитывается около 62 339 крупных плотин. Крупные плотины характеризуются высотой более 15 м или объемом более 3 млн м³ воды. В Китае насчитывается более 23 000 крупных плотин; США – около 9000; Индия, Бразилия, Япония – около 1000 единиц [1].

Малые плотины и дамбы, которые имеют высоту до 15 м, используются для ирригации, водоснабжения и защиты от наводнений. Общее количество таких сооружений по миру может достигать миллиона.

В Республике Беларусь насчитывается около 10 тыс. ГТС, в которые входят: водохранилища, образованные при строительстве дамб и плотин; гидроэлектростанции; каналы; судходные шлюзы и различные водоемы технического назначения (очистные сооружения, пруды-охладители, хвостохранилища, водоемы для технологической воды).

На 2024 г. в Беларуси имелось 153 водохранилища, 85 из которых имеют площадь более 1 км². Водоохранилища расположены в бассейнах рек: Припять, Днепр, Западный Буг, Виляя, Западная Двина и Неман. Крупнейшие водохранилища Республики Беларусь изображены на рисунке 1 [2].



Рисунок 1. – Крупнейшие водохранилища на территории Республики Беларусь

Аварии на водоемах технического назначения могут привести к выбросу загрязненных сточных вод в окружающую среду. Так, 9 октября 2019 г. в 20:12 на одном из резервуаров для хранения стоков производства химического предприятия ОАО «Полиэф» в Благовещенске (Республика Башкортостан) произошло разрушение участка стены (рис. 2). Около 8 т стоков разлилось на прилегающую территорию, загрязнив территории лесного массива, а также в реку Казмыша. Ущерб, нанесенный природным объектам, оценивается на сумму около 44 млн российских рублей (в ценах на 22 октября 2019 г.). В ходе технического осмотра разрушенного резервуара было определено, что причиной возникновения ЧС явилось неустранение дефектов, выявленных ранее¹.

В Республике Беларусь за последнее десятилетие произошло 176 чрезвычайных ситуаций: природного характера – 107, техногенного характера без пожаров – 69 (рис. 3).

Так, 5 сентября 2017 г. произошла авария на очистных сооружениях свинокомплекса «Невеличи», расположенного на территории Дзержинского района. Прорыв сточных вод из очистных сооружений произошел в мелиоративный канал, расположенный поблизости.

Водоемы технического назначения созданы для определенных промышленных и технических нужд. Они могут использоваться для охлаждения, испарения, усреднения, отстаивания сточных вод, понижения уровня вод, очистки отходов производства. На территории Республики Беларусь насчитывается более 300 водоемов технического назначения.

Основные причины гидродинамических аварий: выработка технического ресурса; неблагоприятные погодные условия; перебой в электропитании; человеческий фактор и сверхпроектная работа сооружений, при которой объем поступающих загрязнений больше рассчитанного, или сооружения не способны на очистку отдельных веществ и материалов.



Рисунок 2. – Последствия разрушения резервуара со стоками производства

¹ Следком Башкирии установил причины ЧП на АО «ПОЛИЭФ» // Рамблер/новости. – 2019. – 22 окт. – URL: <https://news.rambler.ru/other/43072118-sledkom-bashkirii-ustanovil-prichiny-chp-na-ao-polief/> (дата обращения: 20.03.2025).

В результате аварии произошла массовая гибель рыбы, обнаружено более 500 мертвых особей различного вида. В результате гибели рыбы сумма вреда составила более 17 тыс. белорусских рублей (в ценах на 11 сентября 2017 г.)² (рис. 4).

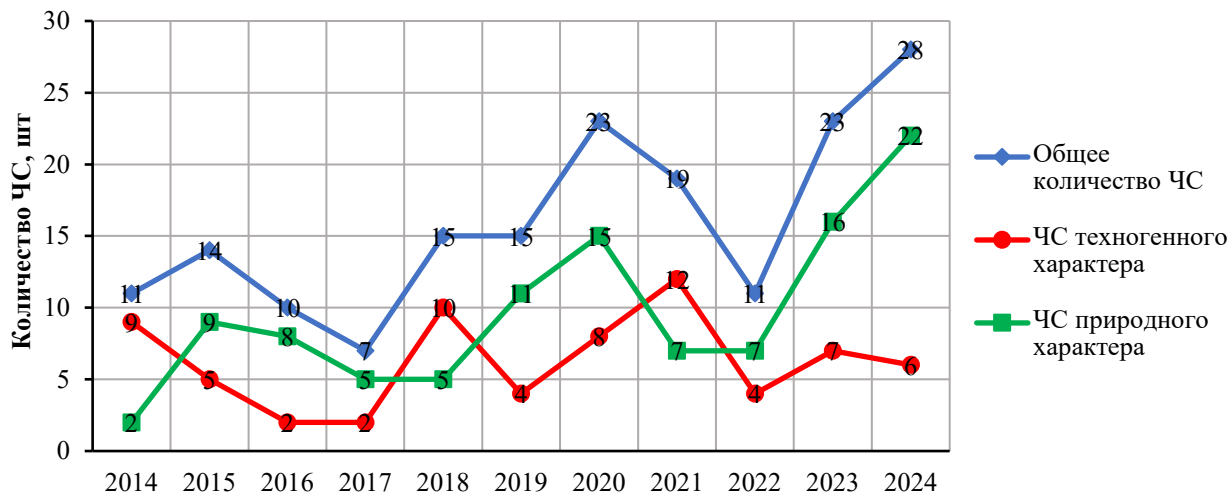


Рисунок 3. – Количество чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь за последние 10 лет



Рисунок 4. – Последствия прорыва сточных вод на очистных сооружениях свинокомплекса

Рассматривая аварии на очистных сооружениях и водоемах технического назначения, можно сделать вывод, что подобные инциденты могут привести к экологической катастрофе, когда загрязнения и ядовитые стоки разливаются на огромные территории, заражая почву, водоемы, грунтовые воды и приводя к значительному материальному ущербу. Исходя из этого необходима разработка организационно-технических мероприятий, которые позволят предотвратить подобные инциденты или снизить их последствия.

Исходя из проведенного анализа литературных источников [3–8] установлено, что в Республике Беларусь проводились исследования по прогнозированию возникновения ЧС и оценке их последствий

на водоемах технического назначения. В ходе работы были обследованы эксплуатирующиеся ГТС на водоемах технического назначения, рассмотрен процесс фильтрации в теле грунтовых дамб (плотин) на них, описаны модели развития деформаций, а также проведена оценка факторов, которые могут повлиять на возникновение чрезвычайных ситуаций на подобных объектах.

В диссертационной работе Д.С. Микановича по прогнозированию возникновения чрезвычайных ситуаций на грунтовых подпорных сооружениях шламохранилищ [4] проведен анализ факторов, способствующих разрушению откосов дамб, а также разработана расчетная методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий на сооружениях шламохранилищ. В ходе разработки методики было установлено, что коэффициент фильтрации в теле грунтовой дамбы (плотины) зависит от концентрации в ней поверхностно-активных веществ, тем самым увеличивает скорость прохождения жидкости через тело плотины (дамбы).

Авторы статьи [7] Е.В. Муравьева, Е.В. Арефьева, Д.О. Копытов, А.И. Шакирова для прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ГТС рассматривают возможность применения

² Мор рыбы в реке в Дзержинском районе произошел из-за прорыва очистных сооружений свинокомплекса // БЕЛТА. – 2017. – 11 сент. – URL: <https://belta.by/incident/view/mor-ryby-v-reke-v-dzerzhinskoy-rajone-proizoshel-iz-za-proryva-ochistnyh-sooruzhenij-svinokompleksa-265989-2017/> (дата обращения: 20.03.2025).

цепи Маркова. Уровни воды в гидротехнических сооружениях классифицированы на 5 категорий (ξ_1 : $\leq 142,5$ м – минимальный; ξ_2 : 142,5–143,5 м – нормальный; ξ_3 : 143,5–144 м – выше нормы; ξ_4 : 144–145 м – критический; ξ_5 : ≥ 145 м – недопустимый). На основе еженедельных замеров за 2019–2020 гг. построена матрица переходов между состояниями. Вероятности переходов рассчитаны нормированием частот. Прогноз на 2021 г. получен возведением матрицы переходов в квадрат (P^2), что соответствует двухшаговому переходу. Модель показала погрешность 8 % при валидации на реальных данных. Подход применим для прогнозирования фильтрационных утечек и эрозионных процессов при наличии инструментального мониторинга.

Разработанные в ФГУП «НИИ ВОДГЕО»³ Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов [8] предназначены для экспертной оценки риска аварий ГТС водохозяйственного и промышленного назначения при декларировании их безопасности, экспертизе декларации безопасности, страховании рисков аварий и формировании Российского регистра ГТС.

В методике приведены понятия риска и уязвимости. Так, риск аварий на гидротехнических сооружениях – вероятностная мера опасности, установленная для гидротехнического сооружения определенной уязвимости в виде возможных потерь. Уязвимость – свойство гидротехнических сооружений терять способность к выполнению заданных функций в результате негативных воздействий [8].

В методических рекомендациях оценки риска представляют собой вероятностные меры опасности, устанавливаемые для ГТС в виде возможных потерь за определенное время в экономической, социальной и экологической сферах. Комплексной характеристикой объекта становится оценка суммарного риска, позволяющая произвести сравнительную оценку ситуации с позиций возможных потерь для существующих или проектируемых объектов. Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности, наиболее существенных для данного сооружения, и условий его эксплуатации.

Под факторами безопасности понимают количественные и качественные характеристики состояния сооружения, природных воздействий и ожидаемого ущерба аварии или разрушения гидротехнических сооружений.

Понятие риска является универсальной количественной мерой потенциальной опасности. Переходя к количественным оценкам опасности, уязвимости, риска, следует иметь в виду, что каждое из них является достаточно сложной функцией многих переменных. Для получения количественных характеристик указанных понятий необходимо определить полный набор таких факторов. Их объединение по совокупностям будем называть показателями (показателями уязвимости, опасности, риска). В зависимости от величин показателей строится градация по степеням опасности, уязвимости, риска. Такой подход позволяет работать уже с довольно ограниченным числом переменных и выполнять количественную оценку, которую можно назвать интегральной.

Методические рекомендации содержат: интегральную оценку опасности аварии ГТС; интегральную оценку уязвимости ГТС; интегральную оценку риска аварии ГТС; примеры расчета риска аварий на ГТС.

Интегральная оценка опасности аварии ГТС производится по четырем основным показателям, каждый из которых оценивается и ранжируется по степени опасности: опасность превышения природных нагрузок и воздействий; обоснованность и соответствие проектных решений нормам; соответствие проекту конструкции, эксплуатации и материалов; возможные последствия и ущерб при аварии. После оценки ГТС по всем показателям производится расчет интегрального коэффициента опасности.

Интегральная оценка уязвимости ГТС производится на основе анализа трех основных показателей, каждый из которых оценивается по четырем уровням: состояние сооружения; организация эксплуатации; готовность к чрезвычайной ситуации. На основе значений показателей рассчитывается коэффициент уязвимости.

Интегральная оценка риска аварий на ГТС производится на основе произведения предыдущих рассчитанных коэффициентов опасности и уязвимости. Полученный коэффициент риска аварии ГТС интерпретируется с табличными данными: $\leq 0,15$ – малый риск

³ Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени комплексный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии "НИИ ВОДГЕО"».

(нормальная безопасность); 0,15–0,30 – умеренный риск (пониженная безопасность, требуются плановые меры); 0,30–0,50 – большой риск (неудовлетворительная безопасность, нужен срочный ремонт/замена оборудования); 0,50 – аварийная ситуация (эксплуатация запрещена до устранения угроз). Физическим смыслом коэффициента риска аварий ГТС является доля от риска, который имеет место на ГТС при наиболее неблагоприятных сочетаниях показателей опасности.

Следует отметить, что в проведенных исследованиях и методических рекомендациях отсутствуют инженерные решения, позволяющие исключить разрушение аварийных дамб (плотин) и минимизировать последствия возможных аварийных ситуаций, что может являться темой дальнейших научных исследований.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на ГТС водоемов технического назначения проводится анализ двух взаимосвязанных аспектов: оценка рисков аварий и моделирование процессов разрушения конструкций. В рамках первого направления разрабатываются методики прогнозирования вероятности возникновения критических ситуаций. Для этого применяются вероятностно-статистические модели, учитывающие совокупность факторов: выработка технического ресурса; неблагоприятные погодные условия; перебои в электропитании; человеческий фактор и ненормативная работа сооружений. В ходе рассмотрения моделей разрушения разрабатываются лабораторные установки, на которых рассматриваются возможные сценарии протекания аварийной ситуации. Однако, несмотря на детализацию научных работ, отсутствует рассмотрение компенсирующих мероприятий, которые являются научным интересом для будущих исследований с целью создания полноценной системы по предупреждению чрезвычайных ситуаций на ГТС. Система компенсирующих мероприятий может состоять из комплекса превентивных и аварийных мероприятий, которые основываются на ранее полученных данных по оценке причин, последствий аварий и влияния концентраций различных веществ в жидкости на устойчивость ограждающих конструкций водоемов технического назначения. Данная система позволит предупредить возникновение ЧС на водоемах технического назначения, предотвратить аварию уже на начальных этапах процессов, способствующих разрушению конструкций, а также уменьшить последствия при возникновении подобной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Register of Dams: General Synthesis // ICOLD CIGB. – URL: https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp (date of access: 20.03.2025).
2. Власов, Б.П. Водохранилища / Б.П. Власов, О.В. Кадацкая // Белорусская энциклопедия. – URL: <https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=4626#h1> (дата обращения: 20.03.2025).
3. Оценить состояние гидротехнических сооружений на водоемах технического назначения с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций: отчет о НИР (заключ.) / Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь; рук. С.М. Пастухов; исполн.: Д.С. Миканович, Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич [и др.]. – Минск, 2018. – 130 с. – № ГР 20163549.
4. Миканович, Д.С. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на грунтовых подпорных сооружениях шламохранилищ Республики Беларусь: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.02 / Д.С. Миканович. – Минск, 2019. – 212 л.
5. Левкевич, В.Е. Сценарии возникновения аварийных ситуаций на шламохранилищах и очистных сооружениях Республики Беларусь / В.Е. Левкевич, Д.С. Миканович, А.В. Врублевский // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 1 (17). – С. 24–31. – EDN: SNEIQZ.
6. Миканович, Д.С. Результаты лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов с целью оценки безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений шламохранилищ / Д.С. Миканович, В.Е. Левкевич // Пожарная и аварийная безопасность: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Иваново, 26–27 нояб. 2015 г. / ФГБОУ ВО «Иванов. пожар.-спас. акад. ГПС МЧС России». – Иваново, 2015. – С. 377–379.
7. Муравьева, Е.В. Прогнозирование чрезвычайной ситуации на гидротехнических сооружениях / Е.В. Муравьева, Е.В. Арефьева, Д.О. Копытов, А.И. Шакирова // Известия Самарского научного

центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 5(103). – С. 82–89. – DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-5-82-89. – EDN: LQTLWQ.

8. Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов: согласовано МЧС РФ 14.08.2001 № 9-4/02-644 // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256358/ (дата обращения: 20.03.2025).

Прогнозирование аварийных ситуаций на водоемах технического назначения
Forecasting emergency situations at technical reservoirs

Миканович Дмитрий Станиславович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», заместитель
начальника университета по учебной работе
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: dmikanovich@list.ru
SPIN-код: 1516-9648

Dmitriy S. Mikanovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Deputy Chief of the University
for Academic Affairs
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: dmikanovich@list.ru
ORCID: 0000-0002-3560-1741

Курский Иван Александрович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: ikursky911@yandex.by

Ivan A. Kurskiy

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ikursky911@yandex.by
ORCID: 0009-0009-3851-3294

Казутин Евгений Геннадьевич

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: EKazutin@tut.by

Evgeniy G. Kazutin

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Rescue Equipment,
Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: EKazutin@tut.by
ORCID: 0009-0008-1498-6284

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-4.562>EDN: <https://elibrary.ru/PJJCLP>**FORECASTING EMERGENCY SITUATIONS AT TECHNICAL RESERVOIRS****Mikanovich D.S., Kurskiy I.A., Kazutin E.G.**

Purpose. To analyze statistical data on emergency situations at hydraulic structures, assess their main causes and consequences, and formulate the topics for future research in the field of forecasting and preventing emergency situations at hydraulic structures.

Methods. Theoretical analysis.

Findings. An analysis of emergency situations at hydraulic structures of technical reservoirs has been carried out, previously conducted research in the field of accident prevention on enclosing structures of technical reservoirs has been studied, the field of scientific interests has been identified in terms of further research in the field of emergency prevention and assessment of stability of enclosing structures of technical reservoirs, and the development of a system of compensating measures to prevent emergencies at structures of this type.

Application field of research. The analysis of accidents at hydraulic structures of technical reservoirs will lay the foundation for future research in order to develop a set of compensatory measures to prevent emergencies at technical reservoirs, «stop» accidents at the initial stages, and reduce the consequences of such situations.

Keywords: hydraulic structures, dam, embankment, technical reservoirs, sewage treatment plants, accident, filtration coefficient, surfactants, system of compensating measures.

(The date of submitting: May 6, 2025)

REFERENCES

1. *World Register of Dams: General Synthesis.* ICOLD CIGB. Available at: https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp (accessed: March 20, 2025).
2. Vlasov B.P., Kadatskaya O.V. Vodokhranilishcha [Water reservoirs]. *Belarusian Encyclopedia.* Available at: <https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=4626#h1> (accessed: March 20, 2025). (rus)
3. Pastukhov S.M., Mikanovich D.S., Kasperov G.I., Levkevich V.E. [et al.] *Otsenit' sostoyanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na vodoemakh tekhnicheskogo naznacheniya s tsel'yu preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy* [To assess the condition of hydraulic structures of technical reservoirs in order to prevent emergencies]: report (final). University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2018. 130 p. State registration No. 20163549. (rus)
4. Mikanovich D.S. *Prognozirovanie vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gruntovykh podpornykh sooruzheniyakh shlamokhranilishch Respubliki Belarus'* [Forecasting the occurrence of emergency situations at underground retaining structures of sludge storage facilities of the Republic of Belarus]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.02. Minsk, 2019. 212 p. (rus)
5. Levkevich V.E., Mikanovich D.S., Vrublevskiy A.V. *Stsenarii vozniknoveniya avariynykh situatsiy na shlamokhranilishchakh i ochistnykh sooruzheniyakh Respubliki Belarus'* [Scenarios of emergency situations at sludge storage facilities and sewage treatment plants of the Republic of Belarus]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus*, 2013. No. 1 (17). Pp. 24–31. (rus). EDN: SNEIQZ.
6. Mikanovich D.S., Levkevich V.E. *Rezultaty laboratornykh issledovaniy po opredeleniyu koeffitsienta fil'tratsii peschanykh gruntov s tsel'yu otsenki bezopasnoy ekspluatatsii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy shlamokhranilishch* [Results of laboratory studies to determine the filtration coefficient of sandy soils in order to assess the safe operation of hydraulic structures of sludge storage facilities]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Fire and emergency safety», Ivanovo, November 26–27, 2015.* Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2015. Pp. 377–379. (rus)
7. Murav'eva E.V., Aref'eva E.V., Kopytov D.O., Shakirova A.I. *Prognozirovanie chrezvychaynoy situatsii na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Forecasting emergencies at hydraulic structures]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021. Vol. 23, No. 5(103). Pp. 82–89. (rus). DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-5-82-89. EDN: LQTLWQ.
8. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke riska avariyy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy vodokhranilishch i nakopiteley promyshlennykh otkhodov* [Methodological recommendations for assessing the risk of accidents at hydraulic structures of reservoirs and industrial waste storage facilities]: approved by the EMERCOM of Russia on August 14, 2001 No. 9-4/02-644. Konsul'tantPlyus: legal reference system. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256358/ (accessed: March 20, 2025). (rus)

Copyright © 2025 Mikanovich D.S., Kurskiy I.A., Kazutin E.G.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА КОМПЛЕКТОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЖАРНОГО НАДЗОРА МЧС РОССИИ ЛИЧНЫМ СОСТАВОМ

Кузнецова М.А., Зарипова С.Н.

Цель. Описание постановки задачи и методического подхода к обоснованию рационального варианта комплектования штатов территориальных подразделений (ТП) государственного пожарного надзора (ГПН), реализация которого позволит повысить уровень готовности последних к выполнению задач в соответствии с предназначением.

Методы. В статье использованы методы системного анализа, эмпирические методы, методы многомерного статистического анализа.

Результаты. На основе анализа статистики пожаров и их последствий, показателей деятельности ТП ГПН выявлена проблемная ситуация, заключающаяся в снижении уровня укомплектованности штатов и, соответственно, увеличении нагрузки сотрудников ГПН, что препятствует выполнению задач в соответствии с их предназначением. Сформулировано противоречие в рассматриваемой предметной области, предложено направление разрешения проблемной ситуации, которое сводится к обоснованию рационального варианта комплектования ТП ГПН личным составом. Представлена постановка задачи, предложен методический подход к ее решению, который может быть реализован на основе последовательного решения трех частных задач.

Область применения исследований. Получение рационального варианта комплектования ТП ГПН на основе предложенной постановки задачи и методического подхода позволит устранить кадровый дефицит в ТП ГПН МЧС России.

Ключевые слова: пожарная безопасность, государственный пожарный надзор, контрольно-надзорные мероприятия, личный состав, комплектование территориальных подразделений, образовательные организации.

(Поступила в редакцию 12 июля 2025 г.)

Введение

Современные вызовы в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) требуют комплексного подхода к обеспечению безопасности, где пожарная безопасность выступает одним из ключевых элементов. Пожары по-прежнему относятся к числу наиболее распространенных и разрушительных видов ЧС, приводящих к человеческим жертвам, значительному материальному ущербу и нарушению функционирования критически важных объектов. В связи с этим эффективная работа ТП ГПН становится важнейшим звеном в общей системе предупреждения и ликвидации последствий ЧС.

Особую актуальность приобретает проблема кадрового обеспечения подразделений ГПН, поскольку именно от уровня их укомплектованности и профессионализма зависит своевременное выявление и устранение нарушений требований пожарной безопасности – одного из основных факторов риска возникновения ЧС. В условиях роста нагрузки на инспекторский состав и увеличения количества контрольно-надзорных мероприятий традиционные подходы к комплектованию штатов демонстрируют свою ограниченную эффективность, что требует поиска новых решений для укрепления кадрового потенциала системы.

Настоящее исследование направлено на разработку методики оптимизации комплектования ТП ГПН, что позволит повысить их готовность к выполнению задач по предупреждению пожаров как одного из наиболее опасных видов ЧС. Предлагаемый подход, основанный на интеграции ресурсов образовательных организаций различной ведомственной принадлежности, способен стать важным элементом совершенствования всей системы обеспечения безопасности в ЧС и гарантировать надежную защиту населения и территорий от пожароопасных угроз.

Основная часть

Статистика общего количества пожаров на территории РФ в 2019–2023 гг. [1] свидетельствует о наличии тенденции к снижению, данные о последствиях пожаров (число погибших, число травмированных, прямой материальный ущерб) – об обратной динамике (рис. 1).

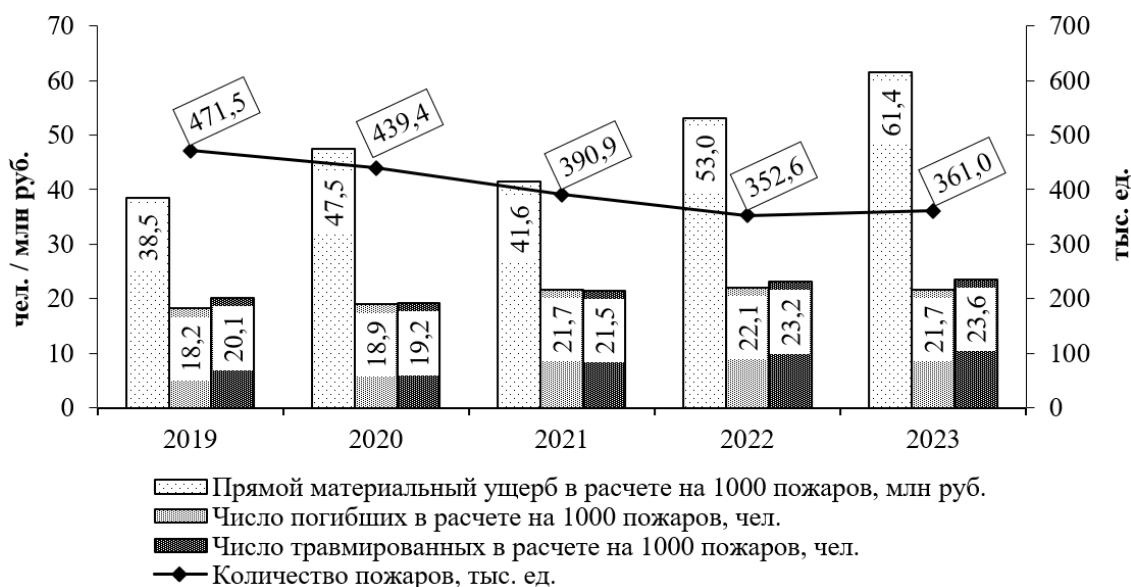


Рисунок 1. – Данные о пожарах в РФ

Причинами возникновения четверти пожаров на объектах защиты, являющихся «имуществом граждан или юридических лиц, государственным или муниципальным имуществом (включая объекты, расположенные на территориях поселений, а также здания, сооружения, строения, транспортные средства, технологические установки, оборудование, агрегаты, изделия и иное имущество), к которым установлены или должны быть установлены требования пожарной безопасности для предотвращения пожара и защиты людей при пожаре»¹, являются нарушения требований пожарной безопасности (ТПБ). Доля таких пожаров, как и их количество, приходящееся на 1000 объектов защиты, ежегодно увеличивается, в то время как количество поднадзорных объектов защиты с 2019 г. сократилось в 4,8 раза (рис. 2).

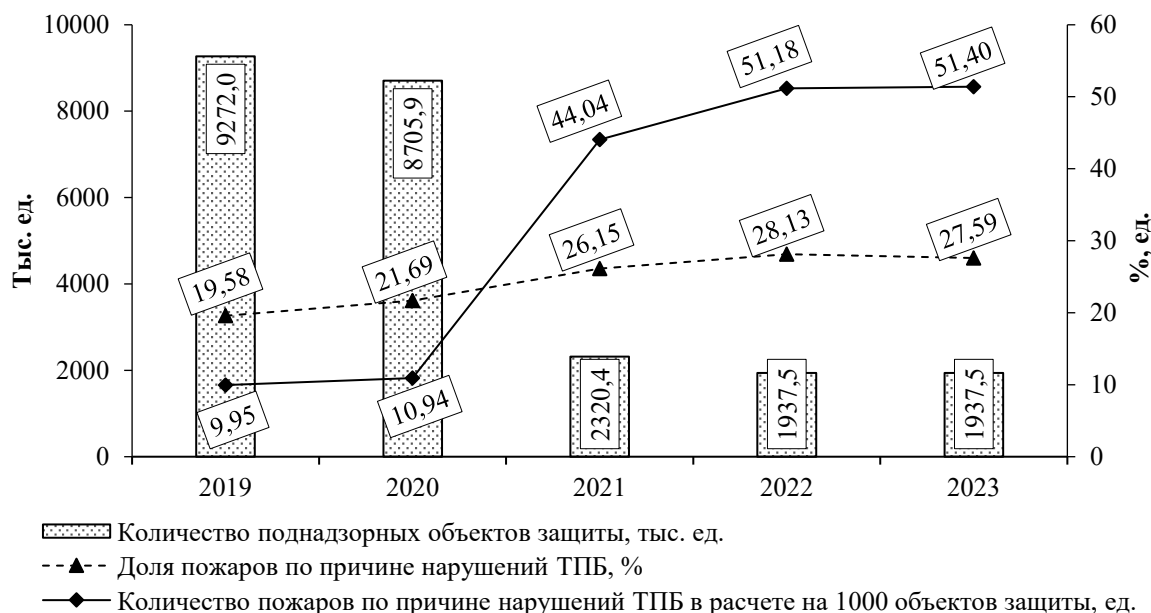


Рисунок 2. – Статистика пожаров по причине нарушений требований пожарной безопасности на поднадзорных объектах защиты

Пожары на объектах защиты способствуют увеличению количества внеплановых контрольно-надзорных мероприятий (КНМ), которое превышает количество плановых КНМ в среднем на 12,5 % (рис. 3). Данное обстоятельство в условиях укомплектованности штатов в среднем на 85 % приводит к существенному увеличению нагрузки инспекторов ГПН в ряде

¹ Объект защиты // Термины МЧС России: офиц. сайт МЧС России. – URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/14> (дата обращения: 02.06.2025).

федеральных округов: среднее количество плановых проверок в расчете на одного инспектора варьируется от 4,4 до 7,2 единиц, среднее количество внеплановых КНМ – от 3,6 до 8,5 единиц (рис. 4). Особенно остро данная проблема проявляется в 36 субъектах федерации (что составляет 42,4 %), в которых укомплектованность штатов ТП ГПН ниже 85 %.

В отдельных субъектах зона ответственности одного инспектора ГПН может достигать 500–600 км², что способствует снижению эффективности контроля за пожарной безопасностью, возрастанию рисков возникновения чрезвычайных ситуаций². В этих условиях особое значение приобретает вопрос своевременного устранения кадрового дефицита в ТП ГПН.



Рисунок 3. – Распределение долей плановых и внеплановых КНМ на объектах защиты

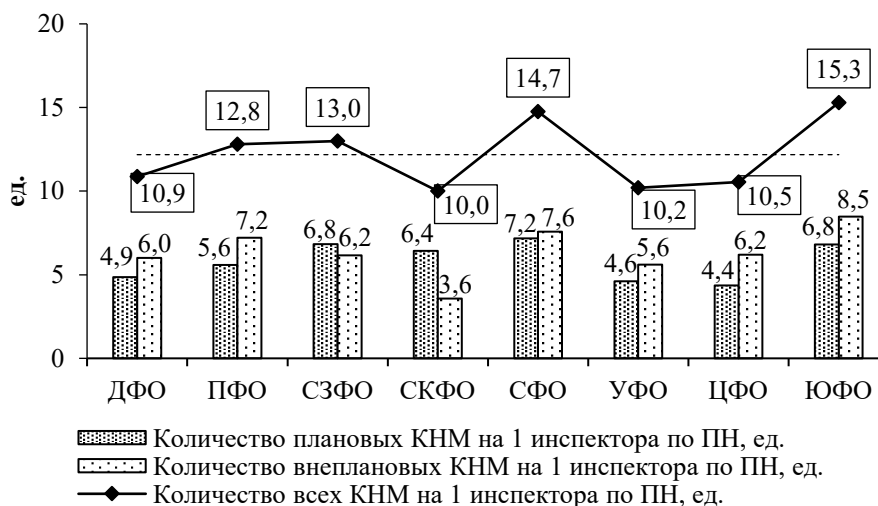


Рисунок 4. – Распределение среднего количества плановых и внеплановых КНМ в 2021–2023 гг. в расчете на одного инспектора

Наиболее распространенными основаниями увольнения сотрудников ГПН являются достижение пенсионного возраста (49 %) и по собственному желанию (44 %). В последние годы доля увольняющихся по собственному желанию превысила суммарную долю увольняющихся по иным основаниям на 13,7 %.

² Борисов, Т. Нехватка инспекторов Госпожнадзора составляет 15 процентов / Т. Борисов // Российская газета. – 2024. – 18 июля. – URL: <https://rg.ru/2024/07/18/mchs-nehvatka-inspektorov-gospozhнадзора-sostavliaet-15-procentov.html> (дата обращения: 20.06.2025).

В соответствии со статистикой число вновь принятых превышает число уволенных в среднем в 1,6 раза. Для устранения кадрового дефицита данное соотношение должно приблизиться в среднем к 2,7 раза (рис. 5).

В соответствии с федеральным законодательством и ведомственными нормативными актами нормативно установленным источником комплектования органов и ТП ГПН являются образовательные организации (ОО), находящиеся в ведении МЧС России (в том числе ОО высшего образования (ВО) и ОО среднего профессионального образования (СПО)). По состоянию на начало 2025 г. в системе МЧС России функционирует территориальная сеть из шести ОО ВО пожарно-технического профиля и одного филиала, призванная обеспечить подготовку квалифицированных кадров, обладающих определенными компетенциями, в соответствии с потребностями ТП ГПН.

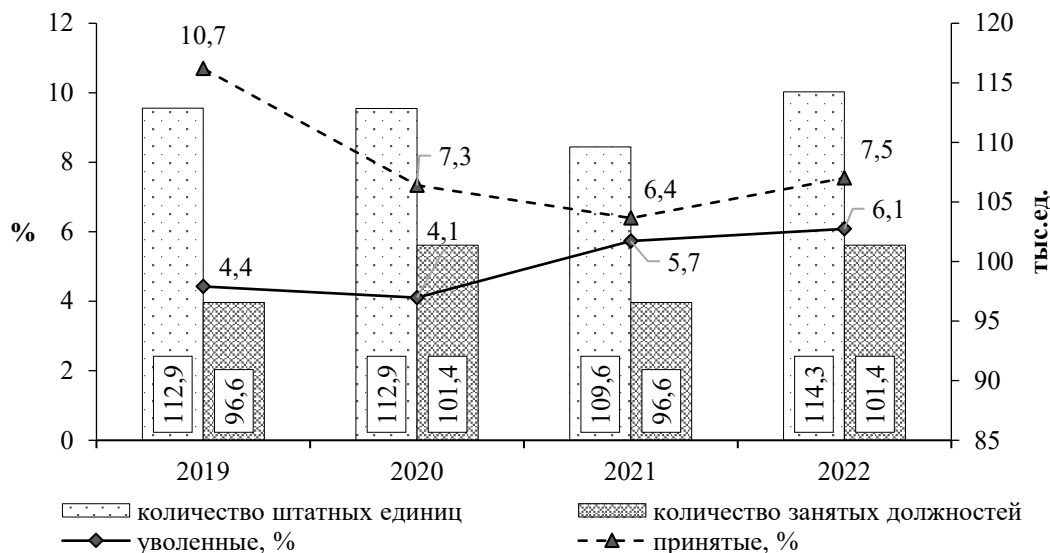


Рисунок 5. – Доли уволенных и принятых от количества штатных единиц ФПС ГПС (по данным [2])

Как показывает практика, ежегодная численность выпускников с пожарно-техническим образованием является недостаточной для устранения дефицита кадров в ТП ГПН. Фактически основными источниками комплектования выступают, как правило, спасательные воинские формирования и иные (внешние) источники (рис. 6). Доли представителей ОО МЧС России, спасательных воинских формирований, внешних источников за анализируемый период составляют в среднем 11,7; 0,68 и 87,6 % соответственно. При существенном превосходстве (в 9,8 раза) числа трудоустроенных в органы и ТП ГПН выпускников ОО МЧС России с профильным ВО над числом выпускников с профильным СПО наблюдается рост доли выпускников с ВО и снижение доли с СПО (рис. 7).

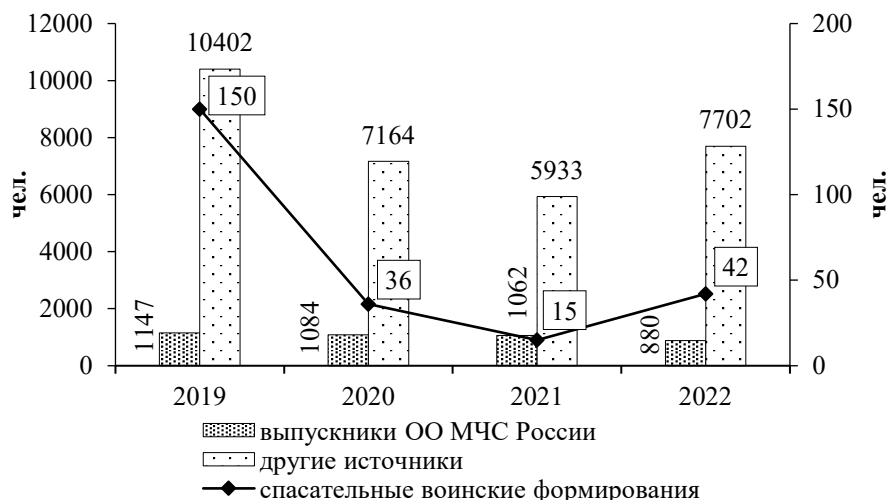


Рисунок 6. – Структура распределения источников комплектования сотрудников, принятых в ГПС МЧС России [2]

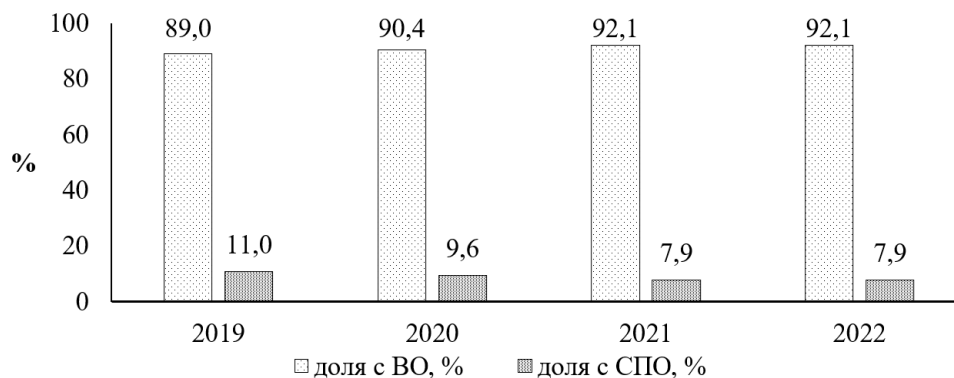


Рисунок 7. – Распределение по уровням образования трудоустроенных в органы и ТП ГПН выпускников ОО МЧС России с пожарно-техническим образованием

Ежегодное уменьшение числа выпускников ОО МЧС России с пожарно-техническим образованием, принятых в органы и ТП ГПН, сопровождается снижением доли специалистов с профильным образованием, которая по данным за анализируемый период составляет в среднем 57,8 %. Высокие доли сотрудников ГПН с непрофильным ВО наблюдаются в значительном количестве субъектов федерации (рис. 8), ежегодный рост числа трудоустроенных с непрофильным ВО зафиксирован более чем в 30 % субъектов РФ.

Увеличение доли личного состава с непрофильным образованием, сопровождающееся снижением профессионализма сотрудников ГПН, приводит к снижению качества проводимых КНМ и, как следствие, увеличению количества пожаров и масштабов их последствий. Сохранение и приумножение высокопрофессиональных кадров, подготовка которых занимает продолжительное время – до 6 лет в ОО ВО МЧС России и до 4 лет в органах и ТП ГПН³, – в текущих условиях требуют принятия нестандартных, более действенных, решений.

Комплектование штатов, являющееся одним из многогранных и ответственных направлений деятельности МЧС России, должно осуществляться с учетом объективных факторов состояния кадрового потенциала, приоритетов социально-экономического развития субъектов федерации, особенностей функционирования конкретных ТП, региональной специфики, ресурсов ОО МЧС России и т.д.

Решающая роль в комплектовании органов и ТП ГПН отводится кадровому планированию, способствующему воплощению кадровой политики МЧС России через такие мероприятия, как определение необходимого численного и качественного состава сотрудников, подбор кадров, предварительный и профессиональный отборы кандидатов на обучение в ОО МЧС России в качестве слушателей (студентов) и курсантов, конкурсный отбор на замещение вакантных должностей, обучение, повышение квалификации и переподготовка кадров, их расстановка и продвижение в сочетании с кадровой экспансией молодых и опытных сотрудников, повышение их мотивации к службе (работе) в органах и ТП ГПН.

Несмотря на принимаемые меры по устранению кадрового дефицита, в органах и ТП ГПН может усугубиться проблемная ситуация, которая заключается в снижении качества проводимых КНМ, что обусловлено высокой текучестью кадров, невозможностью восполнения некомплекта за счет выпускников ОО ВО МЧС России, существенным снижением доли сотрудников ГПН с необходимым уровнем квалификации и опытом профессиональной деятельности.

Проведенный анализ позволил определить возможные пути разрешения проблемной ситуации:

1) увеличение контрольных цифр приема ОО ВО МЧС России (которое в соответствии с действующей нормативно-правовой базой приведет к увеличению штатной численности сотрудников ГПН), до уровня, достаточного для покрытия некомплекта сотрудников ГПН;

2) обучение или переподготовка лиц, трудоустроенных в ТП ГПН из внешних источников, на базе ОО ВО МЧС России;

3) увеличение сроков отработки выпускниками ОО ВО МЧС России по контракту.

Реализация первого и второго направлений приведет к увеличению нагрузки профессорско-преподавательского состава ОО ВО МЧС России, некомплект которого составляет

³ См. сноску 2.

более 16 %. С учетом того что учебная нагрузка, приходящаяся на одного преподавателя в рамках государственного задания на выполнение работ (оказание услуг), составляет в среднем 775 ч, возникнет необходимость увеличения штатной численности последних, что потребует выделения дополнительных финансовых средств. Дополнительное финансирование ОО ВО МЧС России потребуется также для приведения в соответствие с существующими нормами учебно-методических, материально-технических ресурсов, объектов инфраструктуры. Одним из важных факторов при решении организационно-управленческих, социальных и экономических задач, возникающих при реализации данных направлений, является время.

Для реализации третьего направления понадобится внесение соответствующих изменений в действующую нормативно-правовую базу. Разработка проекта документа, этапов согласования и утверждения также связана с временным ресурсом. При увеличении сроков отработки по контракту высока вероятность потери существенной доли потенциальных абитуриентов ОО ВО МЧС России и, соответственно, потенциальных сотрудников ГПН.

Сформулированная проблемная ситуация и результаты анализа возможных направлений ее разрешения позволили определить следующее противоречие в практике:

с одной стороны, необходимо повысить качество проводимых КНМ, что может быть достигнуто за счет перечисленных мероприятий;

с другой стороны, перечисленные мероприятия требуют существенного увеличения кадровых, финансовых и временных ресурсов, объемы которых ограничены.

Одним из перспективных направлений разрешения выявленного противоречия, не требующих выделения дополнительных кадровых, финансовых и иных ресурсов, является повышение качества проводимых КНМ за счет обоснования рационального варианта закрепления ОО ВО Минобрнауки России (далее – вузы), реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля, за ТП ГПН, что позволит устранить кадровый дефицит и повысить долю сотрудников ГПН с необходимым уровнем квалификации и опытом профессиональной деятельности.

Для реализации данного направления необходимо последовательное решение частных задач, описание трех из которых приведено в данной статье:

1) определение критериев отбора вузов для осуществления адресной подготовки востребованных в ТП ГПН кадров по образовательным программам пожарно-технического профиля;

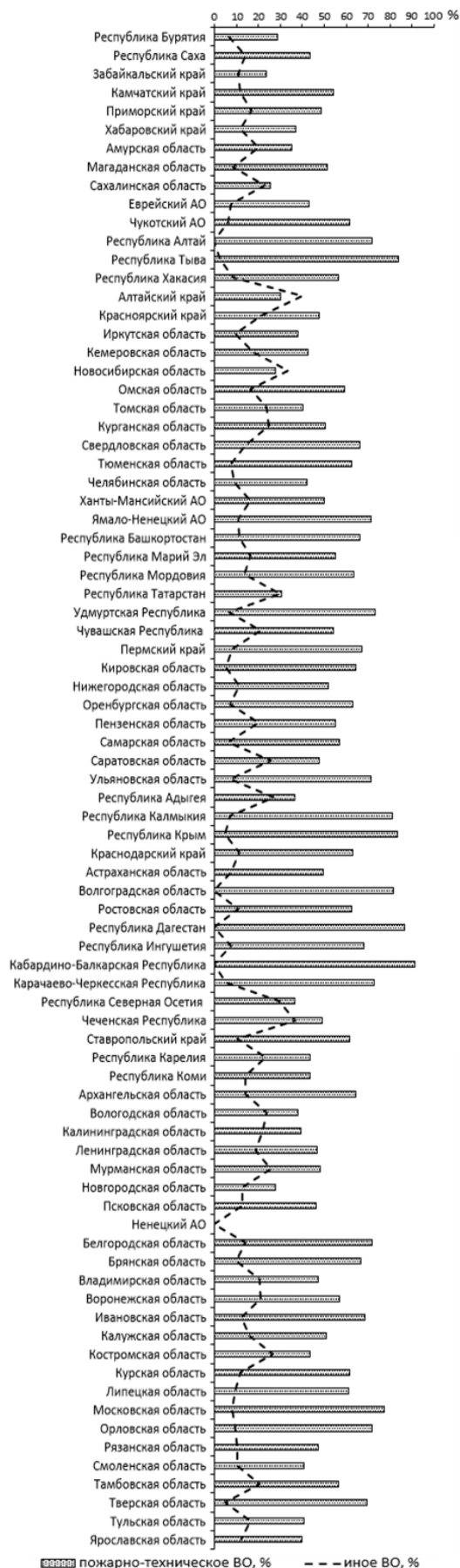


Рисунок 8. – Доли трудоустроенных в органы и ТП ГПН с профильным или иным ВО

2) определение перечня и приоритетности реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля вузов, являющихся потенциальными источниками комплектования ТП ГПН;

3) определение рационального варианта закрепления отобранных вузов за ТП ГПН, максимизирующего укомплектованность последних выпускниками вузов, имеющих наибольший приоритет, при минимальных затратах на подготовку специалистов с заявленными компетенциями.

Результаты

Представим описание каждой из перечисленных выше задач и наиболее приемлемые подходы к их решению с учетом того, что в соответствии с ведомственной нормативной базой приоритетным источником комплектования органов и ТП ГПН продолжают считаться ОО ВО МЧС России. Отобранные на основе установленных критериев вузы, реализующие образовательные программы пожарно-технического профиля, будут представлять собой перспективный источник комплектования кадров с профильным образованием.

Частная задача 1. Из множества определений понятия «критерий» наиболее подходящим применительно к данному исследованию является «признак или основание сравнения однотипных объектов». Ключевым в определении является слово «однотипных», поэтому в качестве таких объектов целесообразно рассматривать вузы, реализующие образовательные программы (далее – ОП) бакалавриата (специалитета, магистратуры) пожарно-технического профиля в рамках направлений подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность, 20.04.01 Техносферная безопасность и (или) специальности 20.05.01 Пожарная безопасность.

Федеральные государственные образовательные стандарты ВО по перечисленным направлениям подготовки (специальности) предъявляют различные требования к результатам освоения программ и условиям их реализации, которые включают общесистемные требования, требования к материально-техническому и учебно-методическому обеспечению, к кадровым и финансовым условиям реализации программ, к применяемым механизмам оценки качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся. В зависимости от набора реализуемых ОП и выбранных профессиональных стандартов условия реализации последних и планируемые результаты их освоения будут существенно отличаться. Многообразию подходов и условий реализации ОП способствуют и другие факторы, в том числе связанные с запросами ключевых работодателей, региональными особенностями и пр.

Если часть необходимой информации о вузах и реализуемых ими ОП, в том числе пожарно-технического профиля, можно формировать на основании открытых данных, то недостающую информацию, в частности, о мотивах выбора вуза для получения ВО пожарно-технического профиля, привлекательности условий обучения, предоставленных возможностях трудоустройства по специальности по завершении обучения, соответствии реальности ожиданиям и другим показателям, которую желательно учитывать в исследовании, можно получить на основе эмпирических методов, в частности, анкетирования определенных групп респондентов.

С учетом приведенного выше предположения опросы целесообразно провести среди следующих групп респондентов: 1) студенты вузов и курсанты ОО ВО МЧС России, получающие ВО пожарно-технического профиля; 2) сотрудники ТП ГПН, получившие ВО пожарно-технического профиля в вузах или ОО ВО МЧС России.

Добиться минимизации непонимания респондентами сути вопросов, уменьшения доли неправдоподобных ответов можно, включая в анкеты основные, буферные и контрольные вопросы, сформулированные в различных видах (вопросы закрытого, полужакрытого и открытого типов).

Как показал пробный опрос, критерии, предлагаемые обучающимися, существенно отличаются от критериев, предложенных сотрудниками ГПН. Если в первом случае акцент делается на личные мотивы и приоритеты, то во втором случае он смещается в сторону приоритетов МЧС России и общества в целом.

Полученные в ходе опроса критерии могут быть неоднородными как по структуре, так и по возможности их дальнейшего использования. Например, критерий «близость вуза к месту проживания» является единичным, а «качество образования» – комплексным; по критериям «качество образования», «квалификация преподавательского состава», «положение в рейтингах» вузы подлежат сравнению между собой, а по критерию «близость вуза

к месту проживания» необходимы дополнительные данные. Отличие еще одного из часто встречающихся критериев – «наличие в вузе военного учебного центра» от других в том, что не всем ОО ВО Минобрнауки предоставляется возможность открывать военные учебные центры, что изначально создает неравные условия между ними. Кроме того, среди критериев, полученных в ходе опроса, будут отсутствовать критерии, важные с точки зрения экспертного сообщества. Например, таким является критерий «доля обучающихся по ОП пожарно-технического профиля в общем контингенте обучающихся вуза». Следовательно, часть критериев, позволяющих сопоставлять вузы между собой, подлежит учету в рамках частной задачи 2, остальная часть – в рамках частной задачи 3.

С учетом перечисленных обстоятельств размеры выборок определяются в предположении, что по итогам опросов будут сопоставляться ответы студентов вузов с ответами курсантов ОО ВО МЧС России; ответы сотрудников ГПН с дипломами ОО ВО Минобрнауки России с ответами сотрудников ГПН с дипломами ОО ВО МЧС России; ответы обучающихся с ответами сотрудников. Для обеспечения репрезентативности выборок формируются стратифицированные выборки, состоящие из двух непересекающихся однородных групп-страт, в которые объединяются в равных долях перечисленные выше категории респондентов групп 1 и 2 [3].

Предлагая респондентам проранжировать варианты их ответов на вопрос о критериях выбора ОО ВО, можно получить два множества значений многомерных величин:

$$X_i^1 = (x_{1i}^1, x_{2i}^1, \dots, x_{H_i}^1), \quad i = \overline{1, N_1},$$

$$X_j^2 = (x_{1j}^2, x_{2j}^2, \dots, x_{H_j}^2), \quad j = \overline{1, N_2},$$

где N_1 и N_2 – количество респондентов группы обучающихся и группы сотрудников ГПН соответственно.

Значения случайных величин обусловлены объективными причинами – факторами, и можно предположить, что их число не зависит от числа респондентов и меньше числа критериев H_e ($e = 1; 2$). Факторы в общем случае являются скрытыми, поэтому не всегда удается измерить их непосредственно. Для выявления факторов применяется метод факторного анализа [4, с. 9–16], который позволяет решить ряд задач, в том числе определить количество действующих факторов и указать их относительную интенсивность, а также выявить факторную структуру изучаемых критериев, т.е. показать долю влияния каждого из факторов на значение того или иного критерия.

Классическим методом снижения размерности полученных множеств является метод главных компонент [4, с. 9–16], который позволяет преобразовать их в другие последовательности переменных, редуцируя совокупность полученных в процессе анкетирования переменных:

$$f_l^1 = a_{l1}^1 \tilde{X}_1^1 + a_{l2}^1 \tilde{X}_2^1 + \dots + a_{lN_1}^1 \tilde{X}_{N_1}^1 = \sum_{i=1}^{N_1} a_{li}^1 \tilde{X}_i^1, \quad \tilde{X}_i^1 = (X_i^1)^T, \quad l = \overline{1, L_1}, \quad L_1 \leq H_1;$$

$$f_r^2 = a_{r1}^2 \tilde{X}_1^2 + a_{r2}^2 \tilde{X}_2^2 + \dots + a_{rN_2}^2 \tilde{X}_{N_2}^2 = \sum_{j=1}^{N_2} a_{rj}^2 \tilde{X}_j^2, \quad \tilde{X}_j^2 = (X_j^2)^T, \quad r = \overline{1, L_2}, \quad L_2 \leq H_2,$$

где f_r^1, f_r^2 – главные компоненты (факторы);

$a_{l1}^1, a_{l2}^1, \dots, a_{lN_1}^1$ и $a_{r1}^2, a_{r2}^2, \dots, a_{rN_2}^2$ – факторные нагрузки.

Путем объединения двух множеств факторов $\{f_1^1, f_2^1, \dots, f_{L_1}^1\}$ и $\{f_1^2, f_2^2, \dots, f_{L_2}^2\}$ формируется общая совокупность факторов $K^0 = \{f_1^0, f_2^0, \dots, f_{L_0}^0\}$.

Дополняя множество K^0 критериями $K^3 = \{f_1^3, f_2^3, \dots, f_{L_3}^3\}$, предложенными экспертным сообществом, и объединяя K^0 с K^3 , получаем искомое множество критериев выбора вузов $K = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$, на основе которых решается вторая частная задача.

Частная задача 2. В рамках второй частной задачи, являющейся следующим шагом в решении задачи обоснования рационального варианта закрепления вузов за ТП ГПН, требуется на основании полученного множества критериев K определить перечень вузов, реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля, а также определить их значимость, т.е. уровень соответствия отобранных вузов рассматриваемым критериям.

С учетом того что сеть ОО ВО МЧС России пожарно-технического профиля, являющихся основными источниками комплектования кадров органов и ТП ГПН, размещена

в двух городах федерального значения и пяти субъектах РФ (г. Москва, г. Санкт-Петербург, Ивановская область, Свердловская область, Красноярский край, Приморский край, Донецкая Народная Республика), в целях соблюдения принципа равномерного распределения потенциальных источников подготовки кадров целесообразно не рассматривать реализующие образовательные программы пожарно-технического профиля вузы, размещенные на территориях перечисленных городов и субъектов.

Критерии k_1, k_2, \dots, k_L можно распределить в три условные группы:

- 1) k_i^1 ($i = 1, 2, \dots, L^1$) – подлежат учету на начальной стадии отбора вузов, например, критерий «наличие военного учебного центра»;
- 2) k_i^2 ($i = 1, 2, \dots, L^2$) – подлежат учету на стадии установления приоритетности вузов (эта группа представляет значительную часть критериев);
- 3) k_i^3 ($i = 1, 2, \dots, L^3$) – подлежат учету в рамках частной задачи 3, например, критерий «близость вуза к месту проживания».

Очевидно, $L^1 + L^2 + L^3 = L$.

После учета критериев первой группы из m_0 вузов, реализующих ОП пожарно-технического профиля, отбирается m вузов:

$$V^0 = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_{m_0}^0\} \rightarrow V^1 = \{v_1, v_2, \dots, v_m\},$$

в отношении которых предстоит установить приоритетность.

Задача установления значимости вузов может быть сформулирована следующим образом: для известного перечня вузов $V^1 = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ и критериев второй группы k_i^2 ($i = 1, 2, \dots, L^2$) необходимо на основе сравнительной оценки определить коэффициенты значимости вузов.

Наиболее предпочтительным методом решения данной задачи является метод анализа иерархий [5, с. 10–85]. Декомпозиция задачи в иерархию приведена на рисунке 9, из которого видно, что вершина иерархии определяет цель, на втором уровне иерархии размещаются критерии второй группы, на основании которых производится сравнительная оценка вузов, на третьем уровне располагаются вузы, значимость или «веса» которых предстоит определить.

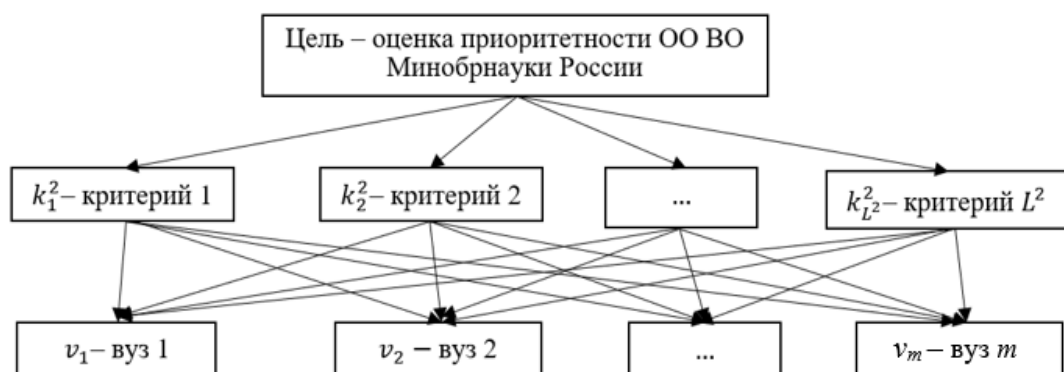


Рисунок 9. – Дерево критериев и альтернатив

В соответствии с методом анализа иерархий этапами определения коэффициентов значимости альтернатив, в качестве которых выступают вузы, являются: построение матрицы попарных сравнений критериев по цели, определение их значимости, оценка согласованности проведенных оценок; построение матриц попарных сравнений альтернатив по критериям, определение локальных приоритетов альтернатив по каждому критерию, оценка согласованности проведенных оценок; определение глобальных приоритетов альтернатив по системе иерархии [5, с. 10–85]. К построению матриц попарных сравнений привлекаются представители экспертного сообщества.

На основе последовательного выполнения перечисленных этапов определяются:

- 1) вектор-столбец W весов w_i критериев второй группы k_i^2 ($i = 1, 2, \dots, L^2$) где L^2 – количество критериев:

$$W^1 = (w_1, w_2, \dots, w_{L^2})^T;$$

2) совокупность вектор-столбцов локальных приоритетов альтернатив по каждому критерию, которую можно представить в виде матрицы S порядка $m \times L^2$:

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1L^2} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2L^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mL^2} \end{pmatrix};$$

3) глобальные приоритеты (веса) альтернатив путем перемножения матриц S и W :

$$(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)^T.$$

Полученные веса, отражающие уровень соответствия вузов критериям, учитываются при закреплении их за ТП ГПН.

Частная задача 3. В данной задаче требуется определить рациональный вариант закрепления вузов за ТП ГПН, доставляющий максимальный уровень укомплектованности сотрудниками ГПН при минимизации затрат вузов на подготовку специалистов с необходимыми компетенциями.

Максимизацию укомплектованности штатов ТП ГПН, которую должны обеспечить вузы, можно заменить минимизацией суммарной разницы между потребностями в кадрах и возможностями вузов для осуществления подготовки определенного количества специалистов по ОП бакалавриата, специалитета, магистратуры. Здесь возможности вузов рассматриваются в контексте предельной численности контингента.

Критерий минимизации затрат вузов на подготовку специалистов с необходимыми компетенциями является комплексным, включающим стоимость подготовки специалистов по ОП пожарно-технического профиля с учетом региональных и иных особенностей, и соответствие критериям, определенным в частной задаче 1. Критерии третьей группы, полученные в результате решения частной задачи 1, в частности, критерий «близость вуза к месту проживания», также подлежат учету на данном этапе.

Допуская, что каждый вуз может быть закреплен за несколькими ТП ГПН, как и каждое ТП ГПН может взаимодействовать с несколькими вузами по вопросам комплектования штатов и что количество закрепляемых вузов в общем случае не совпадает с количеством ТП ГПН, математическую модель обобщенной задачи о назначениях можно представить в виде:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, & F_3 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ F_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, & F_4 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ & & \sum_{i=1}^m x_{ij} &\geq 1, \quad j = \overline{1, n}, \\ & & \sum_{j=1}^n x_{ij} &\geq 1, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

где x_{ij} – булевы переменные:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й вуз закреплен за } j\text{-м ТП ГПН,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

(u_{ij}) – матрица разностей между некомплектом личного состава j -го ТП ГПН и предельной численностью контингента i -го вуза по ОП пожарно-технического профиля;

(v_{ij}) – матрица эффективности (соответствия критериям) i -го вуза по отношению к j -му ТП ГПН;

(r_{ij}) – матрица расстояний между i -м вузом и j -м ТП ГПН;

(c_{ij}) – матрица стоимости подготовки специалистов ГПН i -м вузом для j -го ТП ГПН.

Для решения данной задачи необходимо преобразовать описанную выше модель к модели линейной однокритериальной задачи, которая решается путем свертки набора частных целевых функций-критериев $F_1 - F_4$ в один обобщенный скалярный критерий F [6].

Преобразование исходной модели состоит из следующих этапов:

- 1) нормализация матриц $(u_{ij}), (v_{ij}), (r_{ij}), (c_{ij})$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);
- 2) преобразование нормализованной матрицы (v_{ij}^*) к матрице (v_{ij}^{**}) для перехода от задачи на максимизацию к задаче на минимизацию;
- 3) приведение к модели закрытой многокритериальной задачи путем преобразования прямоугольных матриц $(u_{ij}^*), (v_{ij}^*), (r_{ij}^*), (c_{ij}^*), (x_{ij})$ к квадратным дополнением нулевых строк в случае, если $m < n$, и нулевых столбцов в случае, если $m > n$. Положим, что полученные матрицы имеют размерность $h \times h$, $h = \max\{n, m\}$;
- 4) составление вектора $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ весовых коэффициентов относительной важности целевых функций-критериев методом экспертных оценок, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$, $\alpha_i > 0$, $i = \overline{1, 4}$;
- 5) определение матрицы $G = (g_{ij}) = (\alpha_1 u_{ij}^* + \alpha_2 v_{ij}^{**} + \alpha_3 r_{ij}^* + \alpha_4 c_{ij}^*)$ и составление интегрального критерия $F = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h g_{ij} x_{ij}$;
- 6) решение однокритериальной задачи вида

$$\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h g_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad x_{ij} \in \{0; 1\},$$

$$\sum_{i=1}^h x_{ij} \geq 1, \quad i = \overline{1, h}, \quad \sum_{j=1}^h x_{ij} \geq 1, \quad j = \overline{1, h},$$

например, венгерским методом [7, с. 207–213] или методом Мака [8, с. 95–105], в результате которого получится решение, оптимальное по Парето [9];

- 7) выделение подматрицы (x_{ij}) ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$) в полученном Парето-оптимальном решении.

Варьируя значения весовых коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, можно получить множество Парето-оптимальных решений, среди которых, с учетом предпочтений ЛПР, можно выбрать рациональный вариант закрепления вузов за ТП ГПН.

Заключение

На основе анализа статистики пожаров и их последствий, показателей деятельности территориальных подразделений (ТП) государственного пожарного надзора (ГПН) выявлена проблемная ситуация, заключающаяся в снижении уровня укомплектованности последних и, соответственно, увеличении нагрузки сотрудников ГПН, что препятствует выполнению задач в соответствии с их предназначением. Сформулировано противоречие в рассматриваемой предметной области, предложено направление разрешения проблемной ситуации, которое сводится к обоснованию рационального варианта комплектования ТП ГПН личным составом. Решение данной задачи направлено на устранение кадрового дефицита и повышение доли сотрудников ГПН с необходимым уровнем квалификации и опытом профессиональной деятельности за счет привлечения ресурсов образовательных организаций (ОО) высшего образования (ВО) Минобрнауки России, реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля. ОО ВО Минобрнауки России рассматриваются как потенциальные источники комплектования органов и ТП ГПН наряду с ОО ВО МЧС России, которые определены законодательством в качестве ключевого ведомственного источника подготовки кадров для органов и ТП МЧС России.

Представлена постановка научной задачи, предложен методический подход к ее решению, который может быть реализован на основе последовательного решения трех частных задач, заключающихся в определении критериев отбора ОО ВО Минобрнауки России для осуществления целенаправленной подготовки востребованных в ТП ГПН кадров по образовательным программам пожарно-технического профиля; перечня и приоритетности реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля ОО ВО Минобрнауки России; рационального варианта закрепления отобранных вузов за ТП ГПН, максимизирующего укомплектованность ТП ГПН при минимизации затрат вузов на подготовку специалистов с необходимыми компетенциями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информ.-аналитич. сб. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. – 110 с.
2. Шестаев, А.А. Основные показатели кадрового обеспечения сотрудников ФПС ГПС МЧС России за период 2019–2022 гг. / А.А. Шестаев, Н.А. Ермакова, Т.С. Зубань [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 мая 2023 г. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – С. 916–922.
3. Кузнецова, М.А. Профессиональные траектории сотрудников государственного пожарного надзора / М.А. Кузнецова, С.Н. Зарипова, Р.Ф. Зарипов, П.В. Понурко // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 2 (65). – С. 40–48. – EDN: DIZFWU.
4. Лоули, Д.Н. Факторный анализ как статистический метод / Д.Н. Лоули, А.Э. Максвелл; пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 144 с.
5. Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 198 с.
6. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие / А.В. Лотов, И.И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 196 с.
7. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций / Хемди А. Таха; пер. с англ. – 7-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
8. Банди, Б. Основы линейного программирования / Б. Банди; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
9. Зак, Ю.А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Ю.А. Зак. – М.: Экономика, 2014. – 455 с.

**Постановка задачи обоснования рационального варианта комплектования
территориальных подразделений государственного пожарного надзора
МЧС России личным составом**

**Statement of the problem of substantiating a rational option for staffing territorial divisions
of state fire supervision of the EMERCOM of Russia with personnel**

Кузнецова Мария Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», кафедра промышленной и экологической безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. К. Маркса, 10,
420111, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: kma-kai@yandex.ru
SPIN-код: 7141-7391

Maria A. Kuznetsova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Chair of Industrial and Environmental Safety, Senior Lecturer

Address: K. Marksa str., 10,
420111, Kazan
Republic of Tatarstan, Russia
Email: kma-kai@yandex.ru
ORCID: 0009-0002-4857-4356

Зарипова Сирена Наилевна

доктор технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», кафедра промышленной и экологической безопасности, профессор

Адрес: ул. К. Маркса, 10,
420111, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия
Email: zsn10@mail.ru
SPIN-код: 9353-5607

Sirena N. Zaripova

Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Chair of Industrial and Environmental Safety, Professor

Address: K. Marksa str., 10,
420111, Kazan
Republic of Tatarstan, Russia
Email: zsn10@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9654-8422

STATING OF THE PROBLEM OF SUBSTANTIATING A RATIONAL OPTION FOR STAFFING TERRITORIAL DIVISIONS OF STATE FIRE SUPERVISION OF THE EMERCOM OF RUSSIA**Kuznetsova M.A., Zaripova S.N.**

Purpose. Description of the problem of stating and methodological approach to substantiation of a rational option for staffing territorial divisions (TD) of state fire supervision (SFS), the implementation of which will increase the level of readiness of the latter to perform tasks in accordance with their intended purpose.

Methods. The article uses the methods of systems analysis, empirical methods, and methods of multivariate statistical analysis.

Findings. Based on the analysis of fire statistics and their consequences, performance indicators of TD SFS, a problem situation was identified consisting in a decrease in the level of staffing and, accordingly, an increase in the workload of SFS employees, which hinders the performance of tasks in accordance with their intended purpose. A contradiction in the subject area under consideration is formulated, a direction for resolving the problem situation is proposed in terms of substantiating a rational option for staffing TD SFS. The problem statement is presented, a methodological approach to its solution is proposed, which can be implemented on the basis of a sequential solution of three specific problems.

Application field of research. Obtaining a rational option for staffing the TD SFS based on the proposed stating the problem and methodological approach will help eliminate the personnel shortage in the TD SFS of the EMERCOM of Russia.

Keywords: fire safety, state fire supervision, control and supervisory activities, personnel, staffing of territorial divisions, educational organizations.

(The date of submitting: July 12, 2025)

REFERENCES

1. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2023 godu* [Fires and Fire Safety in 2023]: information and analytical collection. Balashikha: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2024. 110 p. (rus)
2. Shestaev A.A., Ermakova N.A., Zuban' T.S., Tsybulina A.V., Shcherbatykh L.V. Osnovnye pokazateli kadrovogo obespecheniya sotrudnikov FPS GPS MChS Rossii za period 2019–2022 gg. [Key indicators of personnel support for employees of the Federal Fire Service of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia for the period 2019–2022]. *Proc. of XXXV Intern. scientific-practical conf. «Aktual'nye problemy pozharnoy bezopasnosti»*, Moscow, May 31, 2023. Moscow: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2023. Pp. 916–922. (rus)
3. Kuznetsova M.A., Zaripova S.N., Zaripov R.F., Ponurko P.V. Professional'nye traektorii sotrudnikov Gosudarstvennogo pozharnogo nadzora [Professional trajectories of employees in the state fire supervision]. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*, 2025. No. 2 (65). Pp. 40–48. (rus). EDN: DIZFWU.
4. Lawley D.N., Maxwell A.E. *Faktornyy analiz kak statisticheskiy metod* [Factor analysis as a statistical method]; translation from English. Moscow: Mir, 1967. 144 p. (rus)
5. Saaty T.L. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. The analytic hierarchy process]; translation from English. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 198 p. (rus)
6. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy* [Multicriteria decision-making problems]; tutorial. Moscow: MAKS Press, 2008. 196 p. (rus)
7. Taha Hamdy A. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]; translation from English. 7th edition. Moscow: Publishing House «Vil'yams», 2007. 912 p. (rus)
8. Bunday B. *Osnovy lineynogo programmirovaniya* [Basics of linear programming]; translation from English. Moscow: Radio i svyaz', 1989. 176 p. (rus)
9. Zak Yu.A. *Prikladnye zadachi mnogokriterial'noy optimizatsii* [Applied problems of multicriteria optimization]. Moscow: Ekonomika, 2014. 455 p. (rus)

Copyright © 2025 Kuznetsova M.A., Zaripova S.N.

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

**ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей для публикации в научном журнале
«Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси»**

1. Направляемые в Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси статьи должны представлять результаты научных исследований и испытаний, описания технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные обзоры, краткие сообщения, комментарии к нормативным техническим документам, справочные материалы и т.п.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). В этот объем входят таблицы, фотографии, графики, рисунки и список литературы.

3. Статья предоставляется в двух экземплярах. К рукописи статьи прилагаются: а) рекомендация кафедры, научной лаборатории или учреждения образования; б) экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати; в) подписанный лицензионный договор на право опубликования статьи (заключается с каждым автором отдельно и печатается с двух сторон на одном листе). Форма договора размещена на сайте журнала: <https://journals.ucp.by>.

4. Электронная версия статьи, подготовленная в текстовом редакторе Microsoft Word, предоставляется на стандартных носителях либо по электронной почте на адрес: vestnik@ucp.by. Рисунки прилагаются дополнительно как отдельные файлы графического формата.

5. Материал статьи излагается в следующем порядке:

1) информация об авторах (на отдельном листе): фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название, адрес с указанием индекса и страны), должность, рабочий телефон, email (обязательно), имеющиеся персональные идентификационные номера в наукометрических базах (при этом обязательным является указание SPIN-кода РИНЦ, идентификатора ORCID). Если авторов несколько, указывается корреспондент по вопросам содержания статьи;

2) номер УДК (универсальная десятичная классификация);

3) название статьи;

4) аннотация (не менее 200 и не более 300 слов) является основным источником информации о статье, может публиковаться самостоятельно в реферативных журналах и информационных системах в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Аннотация должна раскрывать: *цель* (определяется круг рассматриваемых вопросов, обозначаются цель и задачи работы, объект и предмет исследования); *методы* (излагаются подходы, методы и технологии исследования); *результаты* (приводятся наиболее значимые теоретические положения, экспериментальные данные, подчеркивается их актуальность и новизна); *область применения исследований* (описываются возможности использования полученных результатов, отмечается их научно-практическая значимость);

5) ключевые слова и словосочетания статьи (не более 12 слов);

6) дата поступления статьи (месяц и год);

7) введение; основная часть статьи; заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

8) указание на источник финансирования (если статья подготовлена в рамках выполнения гранта научных исследований);

9) список цитированной литературы. Для каждого источника указывается (при наличии) его DOI. Эксперты международных наукометрических баз данных негативно воспринимают включение в список цитированной литературы источников локального характера (постановлений, законов, инструкций, неопубликованных отчетов, диссертаций, авторефератов и т.п.), электронных материалов и ресурсов сети Интернет. Поэтому ссылки на такие источники рекомендуем оформлять в виде постраничных сносок со сквозной нумерацией.

На отдельной странице на английском языке приводятся следующие сведения: информация об авторах; название статьи; аннотация, обязательно включающая следующие пункты: purpose, methods, findings, application field of research; ключевые слова и словосочетания; транслитерация на латинице и перевод на английский язык списка цитированной литературы.

Для русскоязычных источников в транслитерации на латинице приводятся фамилия, имя, отчество авторов, названия статей, журналов (если нет англоязычного названия), материалов конференций, издательств и на английском языке – названия публикаций и выходные сведения (город, том и номер издания, страницы). Для транслитерации на латиницу следует применять систему транслитерации BGN, при этом можно использовать интернет-ресурсы, например сайт: <http://translit.net>.

Основные требования к оформлению статей, предоставляемых в научный журнал, и пример оформления статьи размещены на сайте издания: <https://journals.ucp.by>.

6. Содержание разделов статьи, таблицы, рисунки, цитированная литература должны отвечать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 7.1-2003 и Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением ВАК Беларуси от 28 февраля 2014 г. № 3.

7. Редакция оставляет за собой право на изменения, не искажающие основного содержания статьи. Рукописи отклоненных статей авторам не возвращаются.

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
МИНИСТЕРСТВА ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

Факультет заочного обучения

Проводит:

Подготовку по специальностям:

6-05-1033-01 «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» с присвоением квалификации «Инженер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций». Форма обучения – заочная. Полный срок обучения – 5 лет, сокращенный – 3 года.

По окончании обучения выдается диплом о высшем образовании государственного образца.

Факультет безопасности жизнедеятельности

Проводит:

Переподготовку лиц с высшим образованием по специальностям:

9-09-1033-02 «Инжиниринг безопасности объектов строительства» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

9-09-1033-03 «Промышленная безопасность» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

9-09-1033-05 «Идеологическая работа и кадровая политика в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям» с присвоением квалификации «Специалист». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

По окончании обучения выдается диплом государственного образца о переподготовке на уровне высшего образования.

Повышение квалификации для руководящих работников и специалистов, имеющих высшее или среднее специальное образование, по образовательным программам:

- «Экспертная деятельность» (в пожарной безопасности);
- «Пожарная безопасность. Предупреждение чрезвычайных ситуаций. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны»;
- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики, применяемых на БелАЭС»;
- «Проектирование систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (инженерно-технические работники)»;
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь»;
- «Промышленная безопасность»;
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности при обращении пиротехнических изделий»;
- «Безопасность горных работ»;
- «Экспертная деятельность в промышленной безопасности»;
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях);
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения, в целях отличных от медицинских);
- «Основы обеспечения ядерной и радиационной безопасности» (для лиц, участвующих в обеспечении ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии);
- «Экспертиза безопасности в области использования атомной энергии» (для работников, оказывающих услуги по проведению экспертизы безопасности в области использования атомной энергии);
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций»;
- «Противодействие коррупции»;
- «Реагирование на инциденты с наличием химических, биологических, радиоактивных и ядерных веществ».

Обучающие курсы для лиц, имеющих профессионально-техническое и общее среднее образование, по образовательным программам:

- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (исполнители работ)»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций».

Семинары по образовательным программам:

- «Оказание первой помощи пострадавшим в ЧС»;
- «Расчет предела огнестойкости (железобетонных, металлических, деревянных, каменных строительных конструкций)»;
- «Расчет времени эвакуации людей при пожаре»;
- «Расчет температурного режима пожара в помещении»;
- «Расчет величины противопожарных разрывов между зданиями, сооружениями и наружными установками»;
- «Расчет площади легкобросываемых конструкций»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Порядок проектирования пассивной противопожарной защиты зданий различного назначения»;
- «Оптимизация затрат на обеспечение требований пожарной безопасности на основании расчетных методов»;
- «Охрана труда в организациях непромышленной сферы».

Подготовку лиц к поступлению в учреждения образования Республики Беларусь по учебным предметам: математика, физика, русский язык, белорусский язык, английский язык, немецкий язык, французский язык, история, обществоведение, химия (очная/дистанционная форма обучения).

Обучение проводит профессорско-преподавательский состав университета и ведущие специалисты Республики Беларусь в области пожарной и промышленной безопасности.

Наш адрес: 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25,
ФЗО: тел/факс +37517 340-71-89,
ФБЖ: тел. +37517 340-69-55, факс +37517 340-35-58, email: fpipk@ucp.by.

Дополнительная информация размещена на сайте университета: <http://ucp.by>
в разделе «Повышение квалификации»

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 9, № 4, 2025

Подписано в печать 25.11.2025.
Формат 60×84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 15,18.
Тираж 35 экз. Заказ 073-2025.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 01.10.2025.
Ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.