

ISSN 2658-6223



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ
МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ

FEDERAL STATE BUDGET
EDUCATIONAL ESTABLISHMENT OF HIGHER EDUCATION
«IVANOVO FIRE RESCUE ACADEMY OF STATE FIREFIGHTING SERVICE
OF MINISTRY OF RUSSIAN FEDERATION FOR CIVIL DEFENSE,
EMERGENCIES AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF NATURAL DISASTERS»

1(58)/2026

ISSN 2658-6223

Управление
в организационных системах
(технические науки)

Строительные конструкции,
здания и сооружения
(технические науки)

Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение
(технические науки)

Водоснабжение, канализация,
строительные системы
охраны водных ресурсов
(технические науки)

Строительные материалы
и изделия
(технические науки)

Экологическая безопасность
(технические и химические
науки)

Пожарная безопасность
(технические науки)

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ

Журнал включен
в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные
научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук ВАК
при Министерстве науки и высшего образования
Российской Федерации»

№ 1 (58), 2026



Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Территория распространения — Российская Федерация, зарубежные страны.

Журнал индексируется в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU / РИНЦ (Россия).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Главный редактор:** Булгаков Владислав Васильевич, кандидат технических наук, доцент
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Заместители главного редактора:** Шарбанова Ирина Юрьевна, кандидат медицинских наук, доцент
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
Федосов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, академик РААСН
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, г. Москва)
Никифоров Александр Леонидович, доктор технических наук, старший научный сотрудник
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
Ульев Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент,
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Научный редактор:** Ульев Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент,
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)

Члены редколлегии:

- Акулова Марина Владимировна — д-р техн. наук, профессор, советник РААСН, заведующая кафедрой архитектуры и урбанистики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)
- Алексеев Михаил Иванович — д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Барбин Николай Михайлович — д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отделения УНК ПИГАСР ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС России» (Россия, г. Екатеринбург)
- Баусов Алексей Михайлович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Бубнов Андрей Германович — д-р хим. наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации пожарной техники, средств связи и малой механизации (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Бутман Михаил Федорович — д-р физ.-мат. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, главный научный сотрудник, профессор кафедры технологии керамики и электрохимических производств ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (Россия, г. Иваново)
- Бутусов Станислав Юрьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий (в составе учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий) ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России» (Россия, г. Москва)
- Горникова Светлана Владимировна — д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры основ экономики функционирования РСЧС Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Гринченко Борис Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры пожарно-строевой, физической подготовки и ГДЗС (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Ерофеев Владимир Трофимович — д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ (Россия, г. Москва)
- Ефремов Александр Михайлович — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры технологии приборов и материалов электронной техники ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (Россия, г. Иваново)
- Камлюк Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, заместитель начальника ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» по научной и инновационной деятельности (Республика Беларусь, г. Минск)
- Ковтун Вадим Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры оперативно-тактической деятельности и техники Гомельского филиала ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» (Республика Беларусь, г. Гомель)
- Колобов Михаил Юрьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (Россия, г. Иваново)
- Краснов Александр Алексеевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Лазарев Александр Александрович — канд. пед. наук, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры правового обеспечения надзорной деятельности (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Лопанов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, директор Регионального учебно-методического центра ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (Россия, г. Белгород)
- Назарычев Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Овчинников Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Присадков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук пожарной безопасности, главный научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Россия, г. Балашиха)
- Румянцева Варвара Евгеньевна — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, директор института информационных технологий, естественных и гуманитарных наук ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)
- Семенов Алексей Олегович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры основ гражданской обороны и управления в ЧС Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Соколов Александр Михайлович — д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (Россия, г. Иваново)
- Степанов Сергей Гаевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры мехатроники и радиоэлектроники ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)
- Сырбу Светлана Александровна — д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Теличенко Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РААСН, президент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (Россия, г. Москва)
- Федосеев Вадим Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Россия, г. Иваново)
- Хафизов Ильдар Фанильевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа)
- Циркина Ольга Германовна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, г. Иваново)
- Шевцов Сергей Александрович — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Россия, г. Воронеж)

Технический редактор: Чуприна Ольга Сергеевна

Дата выхода в свет 27.03.2026 г. Формат 60x90 1/8. Усл. печ. л. 14.5. Тираж 100 экз. Заказ № 224.

Реестровая запись от 15.11.2022 серия ПИ № ФС77-84179

(Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Адрес редакции (издателя): 153040, г. Иваново, проспект Строителей, д. 33.

Тел.: (4932) 93-08-00, доб. 1560; e-mail: journal@edufire37.ru

© Ивановская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России, 2026

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

Шипилов Р. М., Гринченко Б. Б. Анализ времени реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова на примере отечественного и зарубежного опыта 5
Shipilov R. M., Grinchenko B. B. Analysis of response time and arrival of the first units to the call site using domestic and foreign experience 5

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

Гессе Ж. Ф., Шабунин С. А., Фролова Т. В. Поведение пористых каменных материалов при воздействии опасных факторов пожара 21
Gesse Zh. F., Shabunin S. A., Frolova T. V. Behavior of porous building materials under the influence of dangerous fire factors 21

Горский В. Е., Баусов А. М., Комельков В. А., Сорокин Д. В., Митрофанов А. С. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторных батарей 28
Gorsky V. E., Bausov A. M., Komelkov V. A., Sorokin D. V., Mitrofanov A. S. Fire hazard of lithium-ion batteries 28

Кочетова А. А., Ульева С. Н., Шабунин С. А., Никифоров А. Л. Оценка влияния вида источника зажигания на поведение древесных строительных материалов 38
Kochetova A. A., Ulieva S. N., Shabunin S. A., Nikiforov A. L. Assessment of the influence of the nature of the ignition source on the behavior of wooden building materials 38

Мехоношина М. О., Актерский Ю. Е., Таранцев А. А. Модель оценивания и прогнозирования уровня пожарной опасности производственных объектов хранения сжиженного водородного топлива 45
Mekhonoshina M. O., Akterskij Yu. E., Tarantsev A. A. Model for assessing and forecasting the fire hazard level of lng storage facilities 45

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL)**

Гришина Е. П., Румянцева В. Е., Духова Ю. С., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Разработка технологического процесса получения TiO₂ покрытий на конструкционной высококачественной низкоуглеродистой стали для строительной индустрии 53
Grishina E. P., Rumyantseva V. E., Dukhova Yu. S., Kasyanenko N. S., Krasilnikov I. V. Development of a technological process for producing TiO₂ coatings on high-quality low-carbon structural steel for the construction industry 53

Огурцов В. А., Шенберева А. В., Хохлова Ю. В., Огурцов В. А., Парамонов А. Д., Касьяненко Н. С. Стохастическое моделирование процессов фракционирования и перемешивания сыпучих строительных материалов в виброоживленном слое на основе теории цепей Маркова 65
Ogurtsov V.A., Shashenbereva A.V., Khokhlova Yu. V., Ogurtsov V. A., Paramonov A. D., Kasyanenko N. S. Stochastic modeling of fractionation and mixing processes of fractured construction materials in a vibrating liquid slab based on Markov chain theory 65

Федосов С. В., Румянцева В. Е., Красильников И. В., Коринчук М. А., Красильникова И. А. Математическое моделирование нестационарного влагопереноса в арболитовых блоках при сушке с учётом технологических схем организации массообмена 74
Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Krasilnikov I. V., Korinchuk M. A., Krasilnikova I. A. Mathematical modeling of non-stationary moisture transfer in arbolite blocks during drying, taking into account technological schemes for organizing mass exchange 74

**УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS (TECHNICAL)**

- Денисов И. П.** Соотношение ранга пожара и уровней управления (I–IV): управленческая зрелость руководителя тушения пожара как критерий соответствия сложности управленческой задачи 89
Denisov I. P. The relationship between fire rank dynamics and management levels (I–IV): incident commander managerial maturity as a criterion of correspondence to the managerial task complexity..... 89
- Семенов А. О., Суховерхова Л. В., Смирнов А. В., Орешков С. В.** Система информационного обеспечения деятельности дежурной смены центра управления в кризисных ситуациях 94
Semenov A. O., Sukhoverkhova L. V., Smirnov A. V., Oreshkov S. V. Information support system for crisis management center duty shift operations 94
- Щукарев С. Ю., Закинчак А. И.** Совершенствование подходов к применению беспилотных летательных аппаратов для координации деятельности подразделений, задействованных в ликвидации ЧС 103
Shchukarev S. Y., Zakinchak A. I. Improving approaches to the use of unmanned aerial vehicles to coordinate the activities of units involved in emergency response 103

УДК 614.842.65 / 614.849
DOI 10.48612/ntp/b4da-p2hv-r6at

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ РЕАГИРОВАНИЯ И ПРИБЫТИЯ ПЕРВЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ К МЕСТУ ВЫЗОВА НА ПРИМЕРЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

Р. М. ШИПИЛОВ, Б. Б. ГРИНЧЕНКО

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: rim-sgpu@rambler.ru, grinchenko.borya@mail.ru

В статье рассматривается показатель времени реагирования и прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара, как ключевой элемент оперативной эффективности пожарно-спасательных служб. Время прибытия первых подразделений пожарной охраны к месту пожара является критически важным фактором, определяющим успешность тушения огня и спасение человеческих жизней. Настоящая статья посвящена исследованию времени реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова на основе отечественного и зарубежного опыта, на примере России, США, Германии, Великобритании, Бельгии, Греции и Франции. Анализируются подходы к нормированию и мониторингу временных параметров реагирования, включая разложение на этапы: обработка вызова, выезд, следование к месту вызова.

Показано, что время реагирования в разных странах не может быть унифицировано требованиями стандартов, так как имеются различия не только модели пожарной охраны (профессиональная/добровольная), но и плотности дорожной сети, удаленности населенных пунктов и многих других факторов.

Ключевые слова: пожары, пожарная безопасность, пожарная охрана, прием вызова, сбор личного состава на выезд, оперативное реагирование на вызов.

ANALYSIS OF RESPONSE TIME AND ARRIVAL OF THE FIRST UNITS TO THE CALL SITE USING DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

R. M. SHIPILOV, B. B. GRINCHENKO

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: rim-sgpu@rambler.ru, grinchenko.borya@mail.ru

This article examines the response time and arrival time of the first fire brigade at a fire scene as a key element of the operational effectiveness of fire and rescue services. The arrival time of the first fire brigade at a fire scene is a critical factor determining the success of fire suppression and saving lives. This article examines response time and arrival times based on domestic and international experience, including examples from Russia, the United States, Germany, the United Kingdom, Belgium, Greece, and France. Approaches to standardizing and monitoring response time parameters are analyzed, including decomposition into stages: call processing, dispatch, and dispatch. It is shown that response times in different countries cannot be standardized by standard requirements, as there are differences not only in the fire brigade model (professional/volunteer) but also in road network density, remoteness of populated areas, and many other factors.

Keywords: fires, fire safety, fire protection, answering a call, gathering personnel for departure, prompt response to a call.

Актуальность

За последние года возникает тревожная тенденция, где интенсивность и масштаб природных и техногенных пожаров в мире неуклонно растет. Об этом свидетельствуют не только официальные статистические данные, но и результаты исследований, опубликованных в средствах массовой информации (например, в журнале *Nature Ecology & Evolution* статья *Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth* от 24 июня 2024 года [1]). Также следует отметить и результаты научных исследований за последние 5 лет, которые отражаются в трудах С. Б. Кузьмина (2021) [2], Н. Н. Брушлинского, С. В. Соколова, М. П. Григорьевой (2022) [3], Н. Н. Брушлинского, С. В. Соколова, М. П. Григорьевой, П. Вагнера (2024) [4], С. В. Соколова, П. Вагнера (2024) [5], Т. В. Проценко (2025) [6] и многих других.

Увеличение количества пожаров обусловлено не только климатическими изменениями, которые являются одними из факторов стихийных бедствий, но и стремительной урбанизацией, расширением зон человеческой деятельности [7]. Пожары перестали быть просто локальными происшествиями. Они превратились в источник колоссальных материальных потерь, нанося непоправимый ущерб и, что самое трагичное, унося человеческие жизни. Эта реальность диктует необходимость постоянного совершенствования систем управления пожаротушением. Эффективное противостояние огню требует не просто реагирования, а комплексного, продуманного подхода.

Эффективность работы пожарных подразделений определяется множеством факторов, одним из которых, является время прибытия первых пожарных подразделений к месту вызова. Под временем прибытия пожарных подразделений к месту вызова, в трудах А. А. Порошина, В. В. Харина, А. А. Кондашова, Е. В. Бобринева, Е. Ю. Ударцева (2019) [8], понимается промежуток времени от момента получения вызова до момента прибытия первых пожарных подразделений к месту вызова. В него входит получение сигнала о пожаре, быстрая мобилизация ресурсов (сбор личного состава и выезд на место происшествия), а также своевременное прибытие к месту вызова. Научные результаты исследований (А. В. Красавин 2010 [9]; О. Г. Зейнетдинова, И. Ю. Шарабанова, Р. М. Шипилов, П. В. Данилов (2018) [10], А. В. Кузнецов, С. Н. Никишов 2022 [11]; А. И. Овчинников, А. И. Соковнин 2023 [12]; Б. Б. Гринченко, И. А. Кузнецов, А. В. Суwegeин 2025 [13] и др.) доказывают, что быстрое прибытие пожарных к месту происшествия позволяет минимизировать ущерб и предотвратить распространение огня. Данный фактор

приобретает особую актуальность в условиях не только крупных городов, где плотность застройки высока, а транспортные потоки интенсивны, но и в условиях удаленности населенных пунктов от пожарных частей.

Проблемой оперативного и стратегического управления подразделениями пожарно-спасательной службы занимались многие ученые. Методологической основой зарождения научных основ в расчетах оптимальных параметров подразделений были заложены в работах В. А. Пряничникова (1989) [14], Н. Г. Топольского, Ф. А. Исайкина (1995) [15], С. В. Соколова, А. Н. Солодова (1997) [16], Б. М. Пранова (1997) [17], P. Kolesara, W. Walker, J. Hausner (1975) [18], J. F. Campbella (1992) [19]. Позднее, решением этих задач занялись Ф. А. Исайкин (1999) [20], А. Н. Денисов, В. В. Роечко, Ю. М. Сверчков (1999) [21], А. А. Порошин (2009) [22], Ю. А. Матюшин (2009) [23], Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. М. Алехин, Ю. И. Коломиец, П. Вагнер (2016) [24], Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, М. П. Григорьев (2017) [25], Г. И. Абдурегимов (2000) [26], N. Challands (2010) [27] и многие другие. Их работы основываются на методах не только математического, но и имитационного моделирования, теории вероятности и системного анализа [28].

В настоящее время теме, связанной с временем реагирования на вызов, уделяется большое внимание. Количество статей, опубликованных за последние 10 лет, является значительным. Изучение данных источников показывает остроту данной проблемы и ее актуальность на сегодняшний день не только в России, но и в зарубежных странах.

Целью исследования является изучение отечественных и зарубежных подходов к обоснованию управленческих решений по времени реагирования и прибытия первого подразделения к месту вызова.

Методы исследования

В основу методики данного исследования был положен метод литературного обзора. Основными источниками получения информации стали электронные ресурсы на базе *Elibrary.ru*, *Google академия*, официальные сайты. Полученные источники были проанализированы с целью определения качественных характеристик публикаций. В качестве объектов исследования были выбраны следующие страны: Россия, США, Германия, Великобритания, Бельгия, Греция, Франция. Полученные результаты для удобства восприятия были представлены в виде таблиц, содержащих

исчерпывающую информацию о ходе исследования и его результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

Как ранее упоминалось, эффективность пожарной службы во многом определяется скоростью реагирования и скоростью прибытия первых подразделений на место происшествия. В отечественной и зарубежной литературе Ю. А. Матюшина (2009) [23], А. А. Порошина (2009) [22], Н. Н. Брушлинского, С. В. Соколова, Е. М. Алехина, Ю. И. Коломиец, П. Вагнера (2016) [24], Н. Н. Брушлинского, С. В. Соколова, М. П. Григорьева (2017) [25], N. Challandsa (2010) [27] и многих других, отмечается связь между временем реагирования и тушением пожара, скоростью локализации очага и

предотвращением распространения огня. В нашем случае мы исходим из нескольких показателей (рисунок):

– время получения сигнала и обработка вызова (от момента поступления обращения в диспетчерский центр до момента направления подразделения и подтверждения выезда);

– время выезда (от момента оповещения подразделения до фактического начала движения первого автомобиля, этот этап сильнее всего зависит от организационной модели (постоянное дежурство или добровольцы «сбором»)) и внутренних регламентов;

– время следования (от начала движения до прибытия на адрес, зависит от дорожной сети, погодных условий, системы приоритетного проезда, расположения депо, уровня покрытия территории и т.д.).

Алгоритм действий при получении вызова

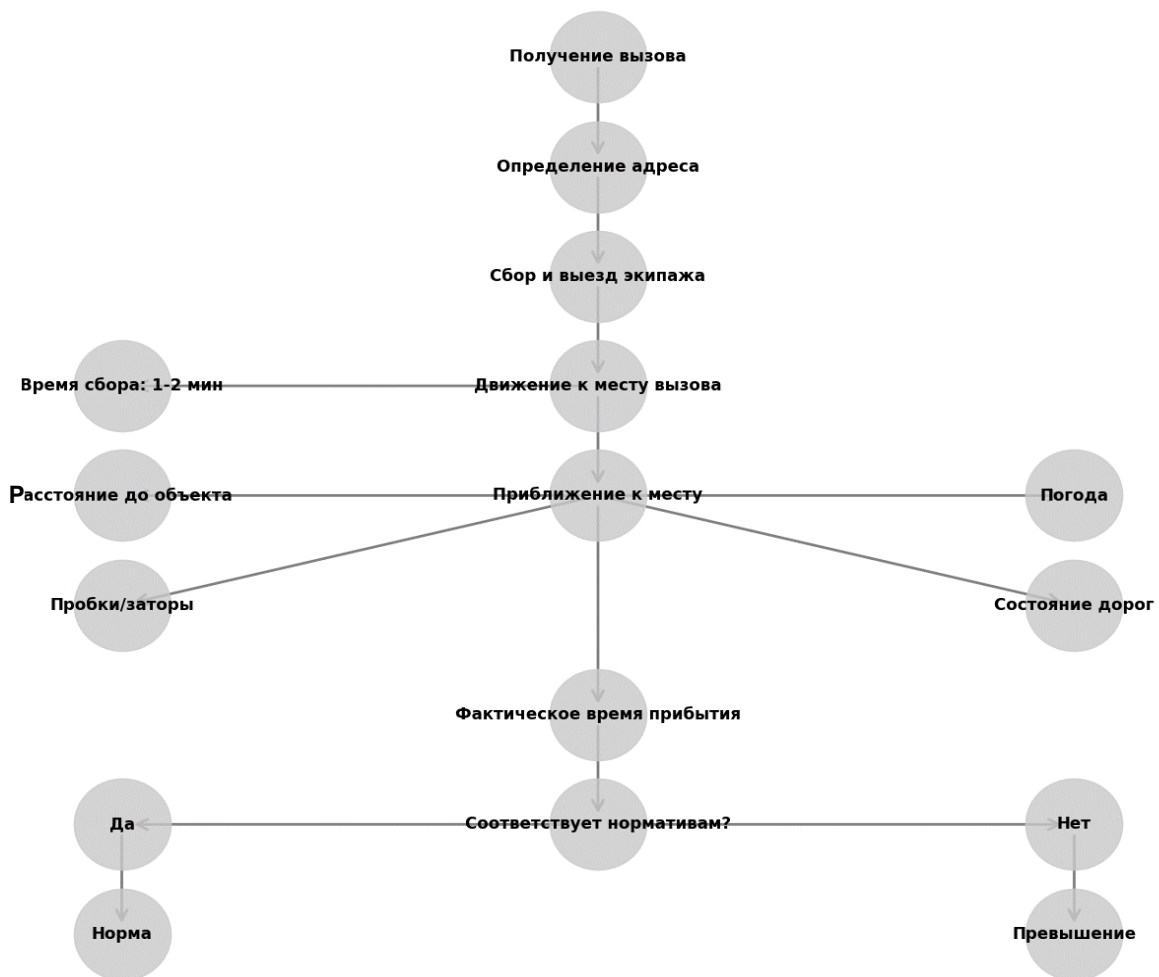


Рисунок. Схема реагирования на время вызова

Итоговый результат этих этапов формирует итоговое «время прибытия» первого пожарного подразделения к месту вызова, в том смысле, который чаще всего интересует население и органы управления. В исследовании проведено изучение отечественного и зарубежного подхода к времени реагирования и прибытия первого подразделения к месту вызова.

В России нормативно-правовая база в области пожарной безопасности создавалась на основании накопленного практического опыта противопожарной службы. В настоящее время нормативная система направлена на риск-ориентированный подход и комплексное управление пожаротушением [29]. Нормативным документом, регламентирующим правовые, экономические и социальные основы пожарной безопасности в РФ является Федеральный закон «О пожарной безопасности»¹. Согласно данному закону пожарная охрана включает в себя Государственную противопожарную службу, а также муниципальную, ведомственную, частную и добровольную пожарную охрану. Основным видом пожарной охраны в России является Государственная противопожарная служба, осуществляющая защиту различных объектов и населенных пунктов. Муниципальная пожарная служба создается в муниципальных образованиях, организуя тушение пожаров на уровне городов и поселков. На базе крупных предприятий и госучреждений создаются ведомственные службы пожарной охраны. Деятельность добровольной пожарной охраны регламентируется Федеральным законом «О

добровольной пожарной охране»². Согласно данному закону в нее включаются общественные объединения, объектовые добровольные пожарные подразделения. Проанализировав статистические данные по штатной численности МЧС России, были получены следующие результаты – 50,5 % личный состав ГПС и 49,5 % личный состав добровольной пожарной охраны^{3, 4}.

Главным фактором, определяющим параметры выполнения поставленных задач по тушению пожаров, являются показатели реагирования на вызов, сбор личного состава и время прибытия на место вызова⁵. В этой связи система нормативного регулирования пожарной охраны представлена в Постановлении Правительства «Об утверждении обязательных требований к организации и функционированию системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112», в том числе порядка и сроков осуществления приема, обработки и передачи вызовов по единому номеру «112» диспетчерским службам»⁶, Федеральном законе «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»⁷ и Приказе МЧС России «Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны»⁸. Согласно данным документов среднее время вызова (опроса) составляет 75 секунд. Время сбора и выезда по сигналу «Тревога!» при посадке личного состава в гараже пожарного депо составляет не менее 30 секунд, а посадка на фасаде пожарного депо не менее 32 секунд. Время прибытия первого

¹ Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» [Электронный ресурс]. URL: Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 № 69-ФЗ (последняя редакция) \ КонсультантПлюс (Дата обращения: 27.01.2026).

² Федеральный закон от 06.05.2011 № 100-ФЗ «О добровольной пожарной охране» [Электронный ресурс]. URL: Добровольная пожарная охрана – Добровольчество (волонтерство) в МЧС России – МЧС России (Дата обращения: 27.01.2026).

³ Указ Президента РФ от 31 декабря 2022 г. № 994 «Об установлении предельной штатной численности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» [Электронный ресурс]. URL: Указ Президента РФ от 31 декабря 2022 г. № 994 «Об установлении предельной штатной численности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» / Документы ленты ПРАИМ: ГАРАНТ.РУ (Дата обращения: 27.01.2026).

⁴ Анализ развития добровольной пожарной охраны в Российской Федерации по итогам 2024 года. Москва. 2025.

⁵ Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от

чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году» / М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018, 376 с.

⁶ Постановление Правительства «Об утверждении обязательных требований к организации и функционированию системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112», в том числе порядка и сроков осуществления приема, обработки и передачи вызовов по единому номеру «112» диспетчерским службам» [Электронный ресурс]. URL: Постановление Правительства РФ от 12.11.2021 № 1931 – Редакция от 12.11.2021 – Контур.Норматив (Дата обращения: 27.01.2026).

⁷ Федеральный закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс]. URL: Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция) / КонсультантПлюс (Дата обращения: 27.01.2026).

⁸ Приказ МЧС России от 05.02.2025 № 77 «Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны» [Электронный ресурс]. URL: Приказ МЧС России от 05.02.2025 № 77 «Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны» (Зарегистрировано в Минюсте России 06.03.2025 № 81466) / КонсультантПлюс (Дата обращения: 27.01.2026).

подразделения к месту вызова в городских поселениях не должно превышать 10 минут, а в сельских поселениях 20 минут (табл. 1) [30]. Однако нужно учитывать тот факт, что на время прибытия пожарных зачастую влияют объективные факторы, к которым можно отнести:

загруженность автомобильных дорог, железнодорожные переезды, состояние дорожного покрытия, погодные условия, отсутствие подъездных путей и т.д. Таким образом время реагирования может меняться.

Таблица 1. Время реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова

№ п/п	Страна	Прием вызова (информации) о пожаре / Сбор личного состава и выезд на место происшествия	Оперативное реагирование на вызовы
1.	Россия	Среднее время вызова (опроса) составляет 75 секунд. Время сбора и выезда по сигналу «Тревога!» при посадке личного состава в гараже пожарного депо составляет не менее 30 секунд, при посадке на фасаде пожарного депо не менее 32 секунд (вызов пожарной охраны при пожаре: 01 – с городского телефона, 101 – с мобильного и городского телефона или 112 – единый номер, работает при нулевом балансе и без SIM-карты).	Время прибытия первого подразделения к месту вызова в городских поселениях не должно превышать 10 мин, а в сельских поселениях 20 мин.

Во многих зарубежных странах нет общих нормативных требований, регулирующих время реагирования пожарных подразделений на вызов. В то же время существуют стандарты Национальной ассоциации противопожарной защиты (National Fire Protection Association, NFPA⁹), которая объединяет специалистов в области пожарной охраны по всему миру. Участниками как правило являются практикующие специалисты в области управления пожарной охраной. Россия, начиная с 1995 г., также входит в данную ассоциацию [31]. С 1982 г. начинает действовать Всемирная федерация ассоциаций пожарных добровольцев (FWVPA), в которую с 1992 г. входит Россия¹⁰. FWVPA включает в себя практически все страны мира, она координирует работу добровольных пожарных организаций. В ее задачи входит разработка рекомендательных правил в области деятельности

добровольных пожарных дружин. NFPA осуществляет деятельность, направленную на предотвращение пожаров и других стихийных бедствий, посредством разработанных стандартов в области пожарной безопасности. К данным стандартам относятся: NFPA 1710¹¹ (для полностью профессиональных подразделений) и NFPA 1720¹² (для добровольных и смешанных пожарных подразделений). В 2026 году в рамках Плана консолидации документов по реагированию на чрезвычайные ситуации, разрабатывается стандарт NFPA 1750¹³ который объединит в себе стандарты NFPA 1710 и NFPA 1720. На сегодняшний день деятельность пожарных подразделений ориентирована на старые стандарты. Пожарные подразделения многих стран стараются придерживаться этих стандартов (табл. 2).

⁹ National Fire Protection Association, NFPA. [Электронный ресурс]. URL: NFPA | Национальная ассоциация противопожарной защиты (Дата обращения: 26.01.2026).

¹⁰ Международные организации в области пожарной безопасности. [Электронный ресурс]. URL: Международные организации в области пожарной безопасности – Энциклопедия пожарной безопасности (Дата обращения: 28.01.2026).

¹¹ NFPA 1710 Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments (NFPA 1710). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-1710-standard-development/1710> (Дата обращения: 17.01.2026).

and-standards/nfpa-1710-standard-development/1710 (Дата обращения: 17.01.2026).

¹² Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations and Special Operations to the Public by Volunteer Fire Departments (NFPA 1720) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1720>. (Дата обращения: 26.02.2026).

¹³ NFPA 1750 Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Services, Special Operations, and Fire Prevention Activities. [Электронный ресурс]. URL: NFPA 1750 Code Development (Дата обращения: 26.02.2026).

Таблица 2. Показатели времени реагирования на вызов согласно требованиям стандарта NFPA

№ п/п	Зона ответственности	Время реагирования
Стандарты NFPA		
1.	Время обработки звонков	Не более 64 с
2.	Время сбора	Сбор личного состава и выезд на место происшествия в течение 80 с
Стандарты NFPA 1710¹⁴		
3.	Время в пути	Прибытие первого подразделения к месту вызова 240 с (4 мин)
Стандарты NFPA 1720 [32]		
4.	Городской район	9 мин
5.	Пригородная зона	10 мин
6.	Сельская местность	14 мин
7.	Удаленная территория	Напрямую зависит от расстояния

Следует отметить, что установленные нормативы обладают определенной степенью гибкости и не носят абсолютного характера, позволяя учитывать специфику конкретных условий и обстоятельств (скорости следования, расстояния между пожарным депо и местом вызова и т.д.). Однако в некоторых странах есть рекомендации по оперативному реагированию на вызов, которые не связаны со стандартами NFPA. Эти нормативы устанавливаются в разных нормативных документах, например, в законах о пожарной охране, публичной отчетности и т.д.

В настоящем исследовании изучены и рассмотрены существующие подходы к обоснованию времени реагирования пожарных подразделений не только в России, но и в зарубежных странах. Был изучен опыт пожарных служб в таких странах как США, Германия, Великобритания, Бельгия, Греция, Франция.

В **Соединенных Штатах Америки** широко цитируется стандарт Национальной ассоциации противопожарной защиты (NFPA), который определяет организацию пожаротушения. В структуру пожарной безопасности США входят профессиональные пожарные службы, представляющие собой сеть муниципальных,

окружных и штатных департаментов. Основу составляют городские пожарные департаменты (Fire Departments), например, FDNY¹⁵, LAFD¹⁶ и добровольные пожарные службы (Volunteer Fire Departments). Из общего числа сотрудников пожарной службы в США профессиональные пожарные составляют 30 %, а добровольцы – 70 %¹⁷. В стандартах NFPA 1710¹⁸ время прибытия первых подразделений к месту вызова определяется прежде всего временем обработки, временем выезда, временем прибытия, а также требованиями по численности и развертыванию пожарно-технического вооружения. Таким образом время реагирования на вызов составляет 15-40 с, время на обработку вызова от 64 с до 106 с, сбор личного состава и выезд профессиональных пожарных служб составляет 60–80 с, добровольцев от 5 до 10 минут. Время прибытия первой пожарной машины 4 мин, многие профессиональные службы густонаселенных районов (городов) стремятся к 8 минутам времени прибытия, в сельской местности время прибытия добровольцев может значительно увеличиться от 9 до 10–15 минут [33, 34] (табл. 3.).

¹⁴ NFPA 1710 RESPONSE TIMES: WHAT YOU NEED TO KNOW [Электронный ресурс]. URL: NFPA 1710 Response Times: What You Need to Know | Emergent (Дата обращения: 26.01.2026).

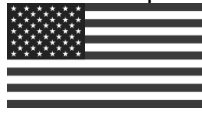
¹⁵ New York City Fire Department. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nyc.gov/site/fdny/index.page> (Дата обращения: 17.01.2026).

¹⁶ Los Angeles Fire Department. [Электронный ресурс]. URL: <https://lafd.org/> (Дата обращения: 17.01.2026).

¹⁷ Большая разница. Журнал Мировой опыт. № 2 (10). [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-bezh.ru/managerUploads/files/journals/10/64-68.pdf#:~:text=%D0%92%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D0%B2%D1%8B%D0%B5%D0%B7%D0%B4%D0%B0%20%D0%BD%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%B2%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%8B%20%D0%B2,%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B6%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%82%20%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B0> (Дата обращения: 25.01.2026).

¹⁸ NFPA Standard 1710 [Электронный ресурс]. URL: https://www.iaff.org/wp-content/uploads/Departments/Fire_EMS_Department/30541_Summary_Sheet_NFPA_1710_standard.pdf (Дата обращения: 25.01.2026).

Таблица 3. Время реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова

№ п/п	Страна	Прием вызова (информации) о пожаре / Сбор личного состава и выезд на место происшествия	Оперативное реагирование на вызовы
1.	Соединенные Штаты Америки 	Время реагирования на вызов составляет 15–40 с, время на обработку вызова от 64 с до 106 с. Сбор личного состава и выезд профессионалов составляет 60–80 с, добровольцев от 5 до 10 мин (вызов пожарной охраны при пожаре: 911 – экстренная оперативная служба, бесплатно с любого телефона).	Время прибытия первой пожарной машины 4 мин, многих профессиональных служб в густонаселенных районах (городах) стремятся к 8 мин, в сельской местности время прибытия добровольцев может значительно увеличиться с 9 мин до 10–15 минут.

Германия обладает одной из наиболее эффективных систем пожарной охраны в мире. Структуру и задачи пожарной охраны определяет Закон о пожарной бригаде (Ein Feuerwehrgesetz¹⁹), однако руководство противопожарной службы находится в ведении 16 федеральных земель²⁰. Для Германии характерна широко распространенная добровольная пожарная дружина (Freiwillige Feuerwehr) в сочетании с профессиональными пожарными частями (Berufsfeuerwehr) и частными пожарными службами (фабрично-заводские)²¹. Профессиональная пожарная охрана в Германии создается в населенных пунктах с населением более 100 тыс. человек, в небольших городах число профессиональных пожарных составляет всего 2 % от общего числа личного состава, а добровольная пожарная дружина создается во всех меньших районах²². Рассматривая вопрос о показателях «времени прибытия первого подразделения» следует обратить внимание на то, что выезд у добровольной пожарной дружины включает время сбора т.е.

прибытие личного состава в депо по сигналу, что существенно влияет на общую величину временных показателей. Также на время прибытия влияет размещение и плотность депо в сельской местности и малых городах. Хотя в Германии нет единого немецкого закона, устанавливающего обязательный срок реагирования, сбора и прибытия первых подразделений к месту вызова, немецкие службы стремятся к максимальной скорости. Время получения сигнала о чрезвычайной ситуации зависит не только от регистрации вызова, но и от времени определения службы экстренной помощи и зоны её действия, а также передачи этого сигнала. Таким образом время звонка составляет приблизительно 1,5 минуты (согласно AGBF Bund). Время сбора личного состава варьируется от 1 минуты в профессиональных пожарных бригадах, до 4 минут в добровольных пожарных бригадах²³. Диапазон для прибытия на место пожара первых подразделений в большинстве случаев, составляет в среднем: в

¹⁹ Feuerwehrgesetz in der Fassung vom 2. März 2010 (Stand: letzte berücksichtigte Änderung: zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 25. Februar 2025 (GBl. 2025 Nr. 14)). [Электронный ресурс]. URL: Landesrecht BW - FwG | Landesnorm Baden-Württemberg | Feuerwehrgesetz (FwG) in der Fassung vom 2. März 2010 | gültig ab: 19.11.2009 (Дата обращения: 17.01.2026).

²⁰ Министерство иностранных дел Российской Федерации. Федеративная Республика Германии. [Электронный ресурс]. URL: Федеративная Республика Германия (справка) - Министерство иностранных дел Российской Федерации (Дата обращения: 14.01.2026).

²¹ Организация пожарной службы в Германии. [Электронный ресурс]. URL: Пожарные в Германии (Дата обращения: 14.01.2026).

²² Большая разница. Журнал Мировой опыт. № 2 (10). [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-bezh.ru/managerUploads/files/journals/10/64-68.pdf#:~:text=%D0%92%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D0%B2%D1%8B%D0%B5%D0%B7%D0%B4%D0%B0%20%D0%BD%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%B2%20%D0%BF%D1%80>

%D0%BE%D1%84%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%8B%20%D0%B2,%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B6%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%82%20%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B0 (Дата обращения: 25.01.2026).

²³ Hans-Peter Plattner: Einsatzgrundzeit von 8 Minuten - Warum? Hilfsfrist. In: www.ff-kell-am-see.de. Freiwillige Feuerwehr Kell am See, 27. November 2002, archiviert vom Original (nicht mehr online verfügbar) am 22. August 2007; abgerufen am 20. Juli 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/2007082234202/http://www.ff-kell-am-see.de/willkommen/nuetzliches/einsatzgrundzeit.html> (Дата обращения: 24.01.2026).

городах 5 минут, в сельской местности 8 минут²⁴ [33].

Деятельность пожарной охраны в **Великобритании** определена Постановлением о реформе регулирования (пожарная безопасность) 2005 года (Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005²⁵). Согласно данному закону, за обеспечение пожарной безопасности отвечают 49 местных пожарно-спасательных служб (Local fire and Rescue authority (FRA)). Также существуют и добровольные пожарные (Volunteer firefighters), играющие важную роль в тушении пожаров в сельской местности и небольших населенных пунктах в Шотландии и Северной Ирландии. В Великобритании подход к «времени реагирования» менее унифицирован единым стандартом, но широко применяется в виде публичной отчетности по Official Statistics²⁶, где ежегодно представляется подробный анализ временных параметров прибытия. Время реагирования определяется временем приема вызова диспетчерской службой, который составляет около 2 минут, временем сбора по тревоге, который регламентируется для штатных пожарных, находящихся на станции круглосуточно, – 90 секунд, для добровольцев, работающих рядом со станцией, – 6,5 минут²⁷. Районы выезда пожарных частей расположены таким образом, чтобы обеспечить минимальное время прибытия. Все районы разделены на классы в зависимости от уровня пожарной опасности. Для каждого класса соответствуют следующие временные параметры: класс «А» и «В» время следования первого пожарного расчета в центре крупных и небольших городов составляет 5 минут, для класса «С» интервал времени в пригороде составляет от 8 до 10 минут, для класса «Д» время следования в сельской местности – 20 минут²⁸ [30, 33, 34]. Особенности британской модели включают широкое применение

вертолетов для доставки персонала и оборудования в труднодоступные районы, а также активную профилактику пожаров посредством образовательных кампаний и сотрудничества с местными сообществами.

Общие правила пожарной службы в **Бельгии** определяет Закон 2007 года «О гражданской безопасности Бельгии» (Wet van 15 mei 2007 betreffende de civiele veiligheid²⁹). Деятельность самих пожарных служб более подробно содержится в Королевских Указах. Согласно закону «О гражданской безопасности», в стране организованы общественные пожарные службы (brandweer) которые подчиняются мэру города или совету муниципалитета. Ответственность за пожарную безопасность лежит на 34 государственных органах («зоны экстренного спасения» (hulpverleningszone)), и Брюссельской пожарной и неотложной медицинской службе (Dienst voor Brandbestrijding en Dringende Medische Hulp «DBDMH») — 35-ый район. Подавляющее большинство пожарных в Бельгии работают на добровольных началах [35], в частности, это касается сельской местности. В муниципалитетах пожарная служба состоит как из профессиональных пожарных, так и из добровольцев – «смешанная». В составе службы DBDMH работают только профессиональные пожарные. Согласно Закону «О гражданской безопасности Бельгии» действует принцип «максимально быстрой адекватной помощи». Хотя по данным различных интернет источников в Бельгии нет правил, определяющих, как быстро пожарные должны прибыть на место чрезвычайной ситуации, существуют данные, которые устанавливают расчетное время реагирования, и оно составляет в среднем 12 минут³⁰. Это время включает приблизительно 4,5 минуты на прием, обработку вызова и выезд, и около 8 минут на время прибытия к месту вызова [34].

²⁴ FIREMAN.CLUB Пожарные и пожарная охрана Германии. [Электронный ресурс]. URL: Пожарные и пожарная охрана Германии: структура и история (Дата обращения: 14.01.2026).

²⁵ Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005: enforcement. Guidance for fire and rescue authorities and other bodies about their duty to enforce fire safety in non-domestic premises. Published 23 October 2007, Last updated 18 September 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-reform-fire-safety-order-2005-guidance-note-enforcement> (Дата обращения: 17.01.2026).

²⁶ Detailed analysis of response times to fires attended by fire and rescue services: England, April 2022 to March 2023 Published 23 November 2023. [Электронный ресурс]. URL: Detailed analysis of response times to fires attended by fire and rescue services: England, April 2022 to March 2023 - GOV.UK (Дата обращения: 17.01.2026).

²⁷ Our response standards. Summer 2025 // Cornwall Fire & rescue service. A service of Cornwall Council.

P. 12. [Электронный ресурс]. URL: [Электронный ресурс]. URL: Пожарные и пожарная охрана Германии: структура и история (Дата обращения: 25.01.2026).

²⁸ FIREMAN.CLUB Пожарные и пожарная охрана Англии. [Электронный ресурс]. URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pozharnye-anglii-pozharnaya-oxrana-anglii/> (Дата обращения: 17.01.2026).

²⁹ Regelgeving. Wet van 15 mei 2007 betreffende de civiele veiligheid. [Электронный ресурс]. URL: https://securitecivile.be/nl/regelgeving?taxonomy_vocabulary_18_target_id=All&taxonomy_vocabulary_1_target_id=18&taxonomy_vocabulary_9_target_id=All&page=5 (Дата обращения: 19.01.2026).

³⁰ The Bulletin serving Belgium's international community. 29.12.2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thebulletin.be/firefighters-average-response-time-115-minutes#:~:text=is%2011.5%20minutes-,Belgium, but%20it%20was%20never%20adopted.> (Дата обращения: 25.01.2026).

Основным законом, регулирующим пожарную безопасность в Греции, является Закон о пожарной безопасности (Νόμος 4662/2020³¹). Главным органом пожарной службы Греции является Греческая пожарная служба (Ελληνική Πυροσβεστική Υπηρεσία), которая подчиняется Министерству гражданской защиты (Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη) и отвечает за предотвращение, реагирование и тушение пожаров, особенно лесных, учитывая климатические риски Греции. Пожарная служба Греции имеет национальную структуру, состоящую из 13 региональных подразделений, которые организуют свою деятельность на определенных территориях. Пожарная охрана Греции состоит, как из профессиональной пожарной охраны (Πυροσβεστικό Σώμα), так и добровольной пожарной охраны (Hellenic Voluntary Firefighters Association (HVFA)), которая играет важную роль в борьбе с частыми лесными пожарами, оказывая помощь в тушении, профессиональным пожарным службам. В Греции нет единого установленного нормативного времени прибытия пожарных. Как и в других Европейских странах, приоритет отдается быстрому реагированию на вызов с учетом дорожных условий. Согласно стандартам NFPA время реагирования на вызов стремится к 4,5 мин., что включает в себя обработку звонка, передачу данных пожарным бригадам и выезд. В среднем время прибытия составляет 10 минут в городах и 30 минут в сельских районах [34, 36].

Во Франции пожарная охрана не выделена отдельной структурой, а входит в состав, как воинских подразделений «Парижская пожарная бригада» (Brigade des sapeurs-pompiers de Paris – BSPP) и «Марсельский военно-морской пожарный батальон» (Bataillon de marins-pompiers de Marseille – BМРМ) [34], обеспечивает защиту Парижа и Марселя, так и

Министерства внутренних дел [37] на остальной территории. Таким образом деятельность пожарно-спасательных служб во Франции урегулирована несколькими нормативными актами (Кодексами), определяющими структуру, и обязанности в служебной деятельности. Основными документами являются Кодекс государственной службы «Code Général de la Fonction Publique» (CGFP)³², Кодекс внутренней безопасности Франции «Code de la sécurité intérieure» (CSI) и др. Французская система организации пожаротушения состоит из добровольцев, профессиональных пожарных и пожарных военных. На добровольные пожарные подразделения приходится 80 % личного состава, на профессиональные части – 16 % и 4 % на пожарных военных³³. В крупных городах пожарные части в основном укомплектованы профессиональными пожарными, в сельской местности тушением пожаров занимаются добровольцы. Французская система отличается наличием обширной базы стационарных постов и патрулирующих экипажей, обеспечивающих быстрое обнаружение возгораний и своевременное информирование ближайших подразделений. Согласно европейским рекомендациям NFPA, которых придерживается Франция, экстренный вызов о пожаре в среднем занимает около 10 секунд, время обработки информации составляет около 1-2 минут в зависимости от сложности ситуации. Время подготовки к выезду должно составлять около 40 с, однако это время варьируется в зависимости от профиля пожарной охраны – профессиональные части или добровольные. У добровольных подразделений время на сбор по объективным причинам больше и составляет от 5 до 10 минут. Время прибытия первых подразделений к месту вызова во Франции не превышает 10 минут в городах и 20 минут в сельской местности [34, 38].

³¹ EN. 4662/2020 (ФЕК 27/A` 7.2.2020). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elinyae.gr/ethnikinomothesia/n-46622020-fek-27a-722020> (Дата обращения: 19.01.2026).

³² Code Général de la Fonction Publique. [Электронный ресурс]. URL: Общий кодекс государственной службы о Папперском правосудии | Pappers Justice: Все французские судебные решения бесплатно (Дата обращения: 20.01.2026).

³³ Большая разница. Журнал Мировой опыт. № 2 (10). [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-bezh.ru/managerUploads/files/journals/10/64-68.pdf#:~:text=%D0%92%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D0%B2%D1%8B%D0%B5%D0%B7%D0%B4%D0%B0%20%D0%BD%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%B2%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%00%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%8B%20%D0%B2,%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B6%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%82%20%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B0> (Дата обращения: 25.01.2026).

Таблица 4. Время реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова

№ п/п	Страна	Прием вызова (информации) о пожаре / Сбор личного состава и выезд на место происшествия	Оперативное реагирование на вызовы
1.	Германия 	Время реагирования и передачи сигнала составляет 90 с, время сбора личного состава профессиональных пожарных бригад до 60 с, добровольных пожарных бригад до 4 мин. (вызов пожарной службы при пожаре: 112 – единый номер, бесплатно с любого телефона).	Время прибытия в городах составляет 5 мин, в сельской местности 8 минут.
2.	Великобритания 	Время реагирования на вызов составляет 7 с и передача сигнала в депо до 100 с., сбор личного состава из штатных пожарных, находящихся на станции круглосуточно – 90 с, добровольцев, работающих рядом со станцией 6,5 минут. (вызов пожарной службы при пожаре: 999 – основной или 112 – экстренная оперативная служба, бесплатно с любого телефона).	Время прибытия первого автонасоса в крупных городах 5 мин, в пригородах 8–10 мин, в сельской местности 20 минут. В удаленных населенных пунктах нормы времени не регламентируются.
3.	Бельгия 	Время на прием, обработку вызова и выезд включает приблизительно 4,5 минуты (вызов пожарной службы при пожаре: 100 – основной, 1591 – борьба с лесными пожарами или 112 – экстренная оперативная служба, бесплатно с любого телефона).	Расчетное время прибытия к месту вызова составляет около 8 минут.
4.	Греция 	Время реагирования на вызов стремится к 4,5 мин, что включает в себя обработку звонка, передачу данных пожарным бригадам и выезд (вызов пожарной службы при пожаре: 199 – основной или 112 – экстренная оперативная служба, бесплатно с любого телефона).	Время прибытия к месту вызова в городах составляет 10 мин, для сельской местности 30 минут.
5.	Франция 	Экстренный вызов о пожаре в среднем занимает около 10 сек, время обработки информации составляет около 1–2 минут. Время подготовки к выезду около 40 с. У профессиональных частей, у добровольных подразделений время на сбор составляет от 5 до 10 минут (вызов пожарной службы при пожаре: 18 – основной или 112 – экстренная оперативная служба, бесплатно с любого телефона).	Время прибытия не должно превышать 10 минут в городах и 20 минут в сельской местности.

Заключение

Во многих странах, согласно проведенному анализу, время реагирования и прибытия первых подразделений к месту вызова различаются. Эти показатели часто зависят от того, насколько велик риск возникновения пожара на конкретном объекте и насколько серьезными могут быть последствия для общества и экономики. Также в некоторых странах радиус действия пожарно-спасательных подразделений может меняться в зависимости от плотности застроенных территорий и количества населения. В связи с этим активно проводятся научные исследования как в России, так и за рубежом,

посвященные вопросам эффективного управления пожарно-спасательными службами [39–44]. Таким образом можно предположить, что установленное время прибытия пожарных должно напрямую зависеть от того, насколько вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций в определенном районе и насколько разрушительными они могут быть.

Проведенный анализ современной системы функционирования пожарной охраны не только России, но и зарубежных стран: Германии, Великобритании, Бельгии, Греции, Франции, США, показывает ее эффективность в решении проблем борьбы с чрезвычайными

ситуациями техногенного и природного характера. Пожарная охрана этих стран, при сохранении исторического названия, по сути, трансформировалась в многофункциональные аварийно-спасательные службы. Такой подход позволяет максимально эффективно использовать

имеющиеся ресурсы, обеспечивая быстрое и скоординированное реагирование на широкий спектр угроз. Это не просто эволюция, а стратегическое решение, направленное на повышение безопасности граждан и минимизацию ущерба от чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology & Evolution*. 24 June 2024.

2. Кузьмин С. Б. Опасные природные процессы – глобальная угроза современности // *Век глобализации*. 2021. № 2. С. 17–29.

3. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Сравнительный анализ обстановки с пожарами в странах мира // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2022. № 4. С. 5–11.

4. Как создавалась мировая пожарная статистика / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, М. П. Григорьева [и др.] // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2024. № 1. С. 69–76.

5. Соколов С. В., Вагнер П. Оценка обстановки с пожарами в мире // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. 2024. Т. 33, № 6. С. 67–84.

6. Проценко Т. В. Математическая модель обоснования необходимости и разработки методики повышения результативности тушения масштабных пожаров // *Вестник СПб ун-та ГПС МЧС России*. 2025. № 4. С. 131–142.

7. Разработка физической 3D-модели огневой полосы для профессиональной подготовки пожарных / Р. М. Шипилов, Б. Б. Гринченко, Д. Ю. Захаров [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 4 (45). С. 125–135.

8. Исследование зависимости риска гибели людей на пожарах от времени прибытия первого пожарного подразделения / А. А. Порошин, В. В. Харин, А. А. Кондашов [и др.] // *Безопасность жизнедеятельности*. М.: ООО «Издательство «Новые технологии»», 2019. № 9 (225). 66 с. С. 3–8.

9. Красавин А. В. Нормативное время прибытия пожарных к месту вызова. Реальность или миф? // *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. Т. 19. № 3. С. 3–6.

10. Особенности прогнозирования пожарной опасности лесных массивов центральной части России / О. Г. Зейнетдинова, И. Ю. Шарабанова, Р. М. Шипилов [и др.] // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2018. № 2 (27). С. 62–64.

11. Кузнецов А. В., Никишов С. Н. Перспективы применения систем видеомони-

торинга для информационной поддержки принятия управленческих решений при ведении боевых действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ // *Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции*. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 371–373.

12. Овчинников А. И., Соковнин А. И. К вопросу выполнения «нормативного» времени прибытия первых подразделений пожарной охраны к месту вызова // *Ройтмановские чтения: сборник материалов XI научно-практической конференции*. Под ред. Д. А. Самошина. М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. С. 107–110.

13. Гринченко Б. Б., Кузнецов И. А., Суровегин А. В. Оценка временных показателей боевого развертывания первым прибывшим пожарно-спасательным подразделением в условиях Арктической зоны // *Актуальные вопросы обеспечения безопасности в Арктической зоне Республики Карелия: сборник материалов Всероссийского круглого стола*. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. С. 9–12.

14. Пряничников В. А. Требования к шасси пожарного автомобиля первой помощи: автореферат дис. ... канд. тех. наук: 05.26.01. М., 1989. 24 с.

15. Топольский Н. Г., Исайкин Ф. А. Декомпозиционный метод оптимального управления мобильными транспортными группами // *Информатизация правоохранительных систем: сборник материалов международной конференции*. М.: Академия МВД РФ, 1995. С. 250.

16. Соколов С. В., Солодов А. Н. Нормирование времени прибытия подразделений ГПС Санкт-Петербурга по зонам городской застройки // *Материалы XIV всероссийской научно-практической конференции*. М., 1997. С. 67–69.

17. Пранов Б. М. Оценка сложности задачи оптимального размещения ресурсов // *Пожарная безопасность - 97: материалы науч.-практ. конф.* М.: МИПБ МВД России, 1997. С. 162.

18. Kolesar P., Walker W., Hausner J. Determining the relation between fire engine travel times and travel distances in New York City.

Operations Research, 1975, vol. 23, issue 4, pp. 614–627.

19. Campbell J. F. Selecting routes to minimize urban travel time. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 1992, vol. 26, issue 4, pp. 261–274.

20. Исайкин Ф. А. Разработка автоматизированной системы поддержки принятия решений о привлечении пожарных подразделений на пожары в крупном городе: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. М., 1999. 26 с.

21. Денисов А. Н., Роевко В. В., Сверчков Ю. М. Определение времени следования пожарного автомобиля к месту вызова // Системы безопасности - 99: материалы VIII науч.-техн. конф. М: МИПЬ МВД России, 1999. С. 235–236.

22. Порошин А. А. Методология проектирования гарнизонов пожарной охраны: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03. М., 2009. 26 с.

23. Матюшин Ю. А. Методические основы проектирования гарнизонов пожарной охраны городских и сельских поселений: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. М., 2009. 24 с.

24. Опыт применения компьютерных имитационных систем моделирования деятельности экстренных служб / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. М. Алёхин [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 8. С. 6–16.

25. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Организация пожарно-спасательных служб в городах мира // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 1. С. 49–55.

26. Абдурагимов Г. И. О проблеме оптимизации границ районов выездов пожарных подразделений города // Пожаровзрывобезопасность. 2000. № 1. С. 3–6.

27. Challands N. The relationships between fire service response time and fire outcomes. *Fire technology*, 2010, vol. 46, issue 3, pp. 665–676.

28. Малютин О. С., Хабибулин Р. Ш. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова // Пожаровзрывобезопасность/FIRE AND EXPLOSION SAFETY 2023. Т. 32 № 5. С. 60–77.

29. Мачкалян С. С. Обзор нормативно-правовой базы РФ в области пожарной безопасности // Международный научный журнал «Вестник науки». Декабрь 2025 г. № 12 (93). Т. 3. С. 1796–1801.

30. Лобода А. В., Муконина И. А. Анализ расположения подразделений пожарной охраны в городах (на примере г. Воронежа) //

Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2013. № 4 (9), С. 29–34.

31. Гурьев А. С., Кобяк В. В., Корнейчук О. Н. О создании добровольных пожарных формированиях в Республике Беларусь // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2014. № 1 (35). С. 15–29.

32. Анализ подходов к нормированию ресурсной обеспеченности подразделений пожарной охраны зарубежных стран / О. В. Стрельцов, О. С. Маторина, О. Г. Меретукова [и др.] // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2021. № 2 (8). С. 41–46.

33. Сибиряков М. В. Информационно-аналитическая поддержка управления оперативными пожарно-спасательными подразделениями: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.10. Москва, 2018. 141 с.

34. Пожарное дело в Европе и на других континентах: обзорное научно-вспомогательное библиографическое пособие, справочник / М.: Академия ГПС МЧС России, 2022. 335 с.

35. Текалина К. Н. Характеристика добровольной пожарной охраны в зарубежных странах // Добровольная пожарная охрана: истоки, проблемы, перспективы. Под ред. О. М. Латышева. 2013. С. 237–240.

36. Красавин А. В. Нормативное время прибытия пожарных к месту вызова. Реальность или миф? // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 3. С. 3–6.

37. Киченина В. С. Правовые основы деятельности противопожарной службы Франции // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2013. № 1 (47), С. 1–4.

38. Носачев А. А. Совершенствование нормативных правовых актов в области обеспечения пожарной безопасности // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. С. 28–31.

39. Суwegeин А. В., Кузнецов И. А., Катин Д. С. Прогнозирование и оценка эффективности размещения пожарных депо: анализ и сравнение методов математического моделирования // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49), С. 206–221.

40. Применение систем поддержки принятия решений руководителями оперативных подразделений при тушении пожаров в крупных городах / Ю. В. Прус, И. М. Тетерин, Н. Г. Топольский [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2008. № 4 (20). С. 1–33.

41. Баканов М. О., Суwegeин А. В., Катин Д. С. Влияние количества личного состава дежурного караула подразделений пожарной охраны на эффективность тушения пожаров // Актуальные вопросы пожаротушения: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская

пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 3–7.

42. Kolesar P., Blum E. H. Square root laws for fire engine response distances. *Management Science*, 1973, vol. 19, issue 12, pp. 1368–1378.

43. Challands N. The relationships between fire service response time and fire outcomes. *Fire technology*, 2010, vol. 46, issue 3, pp. 665–676.

44. Frank K., Spearpoint M., Challands N. Uncertainty in estimating the fire control effectiveness of sprinklers from New Zealand fire incident reports. *Fire technology*, 2014, vol. 50, issue 3, pp. 611–632.

References

1. Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology & Evolution*. 24 June 2024.

2. Kuz'min S. B. Opasnyye prirodnyye protsessy – global'naya ugroza sovremennosti [Hazardous natural processes – a global threat of our time]. *Vek globalizatsii*, 2021, issue 2, pp. 17–29.

3. Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V., Grigor'yeva M. P. Sravnitel'nyy analiz obstanovki s pozharami v stranakh mira [Comparative analysis of the fire situation in countries around the world]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya*, 2022, issue 4, pp. 5–11.

4. Kak sozdavalas' mirovaya pozharnaya statistika [How global fire statistics were created] / N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, M. P. Grigor'yeva [et al.]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya*, 2024, issue 1, pp. 69–76.

5. Sokolov S. V., Vagner P. Otsenka obstanovki s pozharami v mire [Assessment of the fire situation in the world]. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2024, vol. 33, issue 6, pp. 67–84.

6. Protsenko T. V. Matematicheskaya model' obosnovaniya neobkhodimosti i razrabotki metodiki povysheniya rezul'tativnosti tusheniya masshtabnykh pozharov [Mathematical model for substantiating the need and developing a methodology for improving the efficiency of extinguishing large-scale fires]. *Vestnik SPb un-ta GPs MCHS Rossii*, 2025, issue 4, pp. 131–142.

7. Razrabotka fizicheskoy 3D-modeli ognevoy polosy dlya professional'noy podgotovki pozharnykh [Development of a physical 3D model of a fire lane for the professional training of firefighters] / R. M. Shipilov, B. B. Grinchenko, D. Yu. Zakharov [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2022, vol. 4 (45), pp. 125–135.

8. Issledovaniye zavisimosti riska gibeli lyudey na pozharakh ot vremeni pribytiya pervogo pozharnogo podrazdeleniya [Study of the Dependence of the Risk of Fatalities in Fires on the Arrival Time of the First Fire Brigade] / A. A. Poroshin, V. V. Kharin, A. A. Kondashov [et al.]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. Moscow: OOO «Izdatel'stvo «Novyye tekhnologii»». 2019. vol. 9 (225), pp. 3–8.

9. Krasavin A. V. Normativnoye vremya pribytiya pozharnykh k mestu vyzova. Real'nost' ili mif? [Standard Arrival Time of Firefighters to the Call Site. Reality or Myth?]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010, vol. 19, issue 3, pp. 3–6.

10. Osobennosti prognozirovaniya pozharnoy opasnosti lesnykh massivov tsentral'noy chasti Rossii [Features of forecasting fire hazard in forested areas in the central part of Russia] / O. G. Zeynetdinova, I. Yu. Sharabanova, R. M. Shipilov [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2018, vol. 2 (27), pp. 62–64.

11. Kuznetsov A. V., Nikishov S. N. Perspektivy primeneniya sistem videomonitoringa dlya informatsionnoy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri vedenii boyevykh deystviy po tusheniyu pozharov i provedeniyu avariynno-spatatel'nykh rabot [Prospects for the use of video monitoring systems for information support of management decision-making during combat operations to extinguish fires and carry out emergency rescue operations]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: sbornik materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2022. Pp. 371–373.

12. Ovchinnikov A. I., Sokovnin A. I. K voprosu vypolneniya «normativnogo» vremeni pribytiya pervykh podrazdeleniy pozharnoy okhrany k mestu vyzova [On the Issue of Meeting the «Standard» Arrival Time of the First Fire Brigade Units to the Call Site]. *Roytmanovskiye chteniya: sbornik materialov XI nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Pod red. D. A. Samoshina. Moscow: Akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby, 2023. Pp. 107–110.

13. Grinchenko B. B., Kuznetsov I. A., Surovegin A. V. Otsenka vremennykh pokazateley boyevogo razvertyvaniya pervym pribyvshim pozharno-spatatel'nym podrazdeleniyem v usloviyakh Arkticheskoy zony [Assessment of Time Indicators of Combat Deployment of the First Arriving Fire and Rescue Unit in the Arctic Zone]. *Aktual'nyye voprosy obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskoy zone Respubliki Kareliya: sbornik materialov Vserossiyskogo kruglogo stola*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2025. Pp. 9–12.

14. Pryanichnikov V. A. Trebovaniya k shassi pozharnogo avtomobilya pervoy

pomoshchi. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Requirements for the Chassis of a First Aid Fire Truck. Abstract cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1989. 24 p.

15. Topol'skiy N. G., Isaykin F. A. Dekompozitsionnyy metod optimal'nogo upravleniya mobil'nymi transportnymi gruppami [Decomposition method of optimal control of mobile transport groups]. *Informatizatsiya pravookhranitel'nykh sistem: sbornik materialov mezhdunarodnoy konferentsii*. Moscow: Akademiya MVD RF, 1995. 250 p.

16. Sokolov C. B., Solodov A. N. Normirovaniye vremeni pribytiya podrazdeleniy GPS Sankt-Peterburga po zonam gorodskoy zastroyki [Standardization of arrival time of units of the GPS of St. Petersburg by urban development zones] // *Materialy XIV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, 1997. Pp. 67–69.

17. Pranov B. M. Otsenka slozhnosti zadachi optimal'nogo razmeshcheniya resursov [Assessment of the complexity of the problem of optimal resource allocatio]. *Pozharnaya bezopasnost' - 97: materialy nauch.-prakt. konf.* Moscow: MIPB MVD Rossii, 1997. P. 162.

18. Kolesar P., Walker W., Hausner J. Determining the relation between fire engine travel times and travel distances in New York City. *Operations Research*, 1975, vol. 23, issue 4, pp. 614–627.

19. Campbell J. F. Selecting routes to minimize urban travel time. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 1992, vol. 26, issue 4, pp. 261–274.

20. Isaykin F. A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy o privlechenii pozharnykh podrazdeleniy na pozhary v krupnom gorode. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Development of an automated decision support system for involving fire departments in fires in a large city. Abstract cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1999. 26 p.

21. Denisov A. N., Royenko V. V., Sverchkov Yu. M. Opredeleniye vremeni sledovaniya pozharnogo avtomobilya k mestu vyzova [Determining the travel time of a fire engine to the scene]. *Sistemy bezopasnosti – 99: materialy VIII nauch.-tekhn. konf.* Moscow: MIP' MVD Rossii, 1999. Pp. 235–236.

22. Poroshin A. A. Metodologiya proyektirovaniya garnizonov pozharnoy okhrany. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk [Methodology for designing fire protection garrisons: Abstract dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 26 p.

23. Matyushin Yu. A. Metodicheskiye osnovy proyektirovaniya garnizonov pozharnoy okhrany gorodskikh i sel'skikh poseleniy. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Methodological foundations for designing fire protection garrisons of

urban and rural settlements. Abstract cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 24 p.

24. Opyt primeneniya komp'yuternykh imitatsionnykh sistem modelirovaniya deyatel'nosti ekstremnykh sluzhb [Experience in Using Computer Simulation Systems for Modeling the Activities of Emergency Services] / N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, Ye. M. Alokhin [et al.]. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 2016, vol. 25, issue 8, pp. 6–16.

25. Brushlinskiy N. N., Sokolov C. B., Grigor'yeva M. P. Organizatsiya pozharno-spatel'nykh sluzhb v gorodakh mira [Organization of Fire and Rescue Services in Cities of the World]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya*, 2017, issue 1, pp. 49–55.

26. Abduragimov G. I. O probleme optimizatsii granits rayonov vyyezdov pozharnykh podrazdeleniy goroda [On the Problem of Optimizing the Boundaries of City Fire Department Departure Areas]. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 2000, issue 1, pp. 3–6.

27. Challands N. The relationships between fire service response time and fire outcomes. *Fire technology*, 2010, vol. 46, issue 3, pp. 665–676.

28. Malyutin O. S., Khabibulin R. Sh. Obzor podkhodov, metodov i algoritmov obosnovaniya upravlencheskikh resheniy po snizheniyu vremeni pribytiya podrazdeleniy pozharnoy okhrany k mestu vyzova [Review of approaches, methods, and algorithms for substantiating management decisions to reduce the arrival time of fire departments to the scene]. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire And Explosion Safety*, 2023, vol. 32, issue 5, pp. 60–77.

29. Machkalyan S. S. Obzor normativno-pravovoy bazy RF v oblasti pozharnoy bezopasnosti [Review of the regulatory framework of the Russian Federation in the field of fire safety]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Vestnik nauki»*, Dekabr' 2025 g., vol. 12 (93), issue 3, pp. 1796–1801.

30. Loboda A. V., Mukonina I. A. Analiz raspolozheniya podrazdeleniy pozharnoy okhrany v gorodakh (na primere g. Voronezha) [Analysis of the Location of Fire Departments in Cities (using Voronezh as an Example)]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MCHS Rossii*, 2013, vol. 4 (9), pp. 29–34.

31. Gur'yev A. S., Kobayak V. V., Korneychuk O. N. O sozdanii dobrovol'nykh pozharnykh formirovaniyakh v Respublike Belarus' [On the Creation of Voluntary Fire Departments in the Republic of Belarus]. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya*, 2014, vol. 1 (35), pp. 15–29.

32. Analiz podkhodov k normirovaniyu resursnoy obespechennosti podrazdeleniy pozharnoy okhrany zarubezhnykh stran [Analysis of Approaches to Standardizing the Resource

Availability of Fire Departments in Foreign Countries] / O. V. Strel'tsov, O. S. Matorina, O. G. Meretukova [et al.]. *Aktual'nyye voprosy pozharnoy bezopasnosti*, 2021, vol. 2 (8), pp. 41–46.

33. Sibiryakov M. V. Informatsionno-analiticheskaya podderzhka upravleniya operativnymi pozharno-spatatel'nymi podrazdeleniyami. Diss. kand. tekhn. nauk [Information and Analytical Support for the Management of Operational Fire and Rescue Units. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2018. 141 p.

34. *Pozharnoye delo v Yevrope i na drugikh kontinentakh: obzornoye nauchno-vspomogatel'noye bibliograficheskoye posobiye, spravochnik* [Firefighting in Europe and Other Continents: A Review Scientific and Auxiliary Bibliographic Handbook, Reference Book]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2022. 335 p.

35. Tekalina K. N. Kharakteristika dobrovol'noy pozharnoy okhrany v zarubezhnykh stranakh [Characteristics of Voluntary Fire Departments in Foreign Countries]. *Dobrovol'naya pozharnaya okhrana: istoki, problemy, perspektivy*. Pod red. O. M. Latysheva. 2013. pp. 237–240.

36. Krasavin A. V. Normativnoye vremya pribytiya pozharnykh k mestu vyzova. Real'nost' ili mif? [Standard Time of Arrival of Firefighters to the Scene of a Call. Reality or Myth?]. *Pozharovzryvo-bezopasnost'*, 2010, vol. 19, issue 3, pp. 3–6.

37. Kichenina V. S. Pravovyye osnovy deyatelnosti protivopozharnoy sluzhby Frantsii [Legal Foundations of the Activities of the Fire Service of France]. *Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti»*, 2013, vol 1 (47), pp. 1–4.

38. Nosachev A. A. Sovershenstvovaniye normativnykh pravovykh aktov v oblasti obespecheniya pozharnoy bezopasnosti [Improvement of Regulatory Legal Acts in the Field of Ensuring Fire Safety]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2017., pp. 28–31.

39. Surovegin A. V., Kuznetsov I. A., Katin D. S. Prognozirovaniye i otsenka effektivnosti razmeshcheniya pozharnykh depo: analiz i sravneniye metodov matematicheskogo modelirovaniya [Forecasting and Evaluation of the Efficiency of Fire Station Placement: Analysis and Comparison of Mathematical Modeling Methods]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2023, vol. 4 (49), pp. 206–221.

40. Primeneniye sistem podderzhki prinyatiya resheniy rukovoditelyami operativnykh podrazdeleniy pri tushenii pozharov v krupnykh gorodakh [Application of decision support systems for heads of operational units during fire extinguishing in large cities] / Yu. V. Prus, I. M. Teterin, N. G. Topol'skiy *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2008, vol. 4 (20), pp. 1–33.

41. Bakanov M. O., Surovegin A. V., Katin D. S. Vliyaniye kolichestva lichnogo sostava dezhurnogo karaula podrazdeleniy pozharnoy okhrany na effektivnost' tusheniya pozharov [Influence of the number of personnel on duty of fire protection units on the efficiency of fire extinguishing]. *Aktual'nyye voprosy pozharotusheniya sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2023. Pp. 3–7.

42. Kolesar P., Blum E. H. Square root laws for fire engine response distances. *Management Science*, 1973, vol. 19, issue 12, pp. 1368–1378.

43. Challands N. The relationships between fire service response time and fire outcomes. *Fire technology*, 2010, vol. 46, issue 3, pp. 665–676.

44. Frank K., Spearpoint M., Challands N. Uncertainty in estimating the fire control effectiveness of sprinklers from New Zealand fire incident reports. *Fire technology*, 2014, vol. 50, issue 3, pp. 611–632.

Шипилов Роман Михайлович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат педагогических наук, доцент

E-mail: rim-sgpu@rambler.ru,

Shipilov Roman Mikhailovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of pedagogical Sciences, associate Professor

E-mail: rim-sgpu@rambler.ru

Гринченко Борис Борисович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук

E-mail: grinchenko.borya@mail.ru

Grinchenko Boris Borisovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy
of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences

E-mail: grinchenko.borya@mail.ru

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

УДК 66.018.4
DOI 10.48612/ntp/g811-tbak-4mfh

**ПОВЕДЕНИЕ ПОРИСТЫХ КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА**

Ж. Ф. ГЕССЕ, С. А. ШАБУНИН, Т. В. ФРОЛОВА

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: zhenni.gesse@mail.ru, sergeyshabunin@yandex.ru, frolovatanja@mail.ru

В работе проведена оценка устойчивости пористого строительного материала – камня ракушечника, добываемого на территории Республики Крым, к действию температуры. Методом синхронного термического анализа проведён комплекс испытаний, направленных на изучение изменений физических и механических свойств материала при нагревании. Результаты исследования позволяют определить пределы температурной стойкости камня ракушечника и дают рекомендации по его применению в условиях, связанных с повышенными температурами. Полученные данные могут быть использованы для оценки огнестойкости строительных конструкций и обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Экспериментально установлено, что наименьшая убыль массы при нагревании камней ракушечника наблюдается у менее пористых образцов, обладающих наибольшей теплопроводностью. Полученные данные согласуются с результатами работ, в которых отмечается, что образцам с более высокой пористостью соответствует большая потеря массы при нагреве до 1000 °С. Определение остаточной массы при нагревании образцов камней ракушечника позволяет сделать вывод, что образцы имеют отличающийся химический состав.

Ключевые слова: камни ракушечника, пористость, устойчивость к действию температуры.

**BEHAVIOR OF POROUS BUILDING MATERIALS
UNDER THE INFLUENCE OF DANGEROUS FIRE FACTORS**

Zh. F. GESSE, S. A. SHABUNIN, T. V. FROLOVA

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: zhenni.gesse@mail.ru, sergeyshabunin@yandex.ru, frolovatanja@mail.ru

The work assesses the resistance of a porous building material, shell rock, extracted in the Republic of Crimea, to temperature. A set of tests was conducted using synchronous thermal analysis to study the changes in the physical and mechanical properties of the material during heating. The results of the study determine the temperature resistance limits of shell rock and provide recommendations for its use in environments with high temperatures. These findings are crucial for ensuring the durability and reliability of building structures that utilize this material.

It has been experimentally established that the least mass loss during heating of shell rock stones is observed in less porous samples with the highest thermal conductivity. These findings are consistent with previous studies that have shown that samples with higher porosity tend to experience greater mass loss during heating up to 1000 °C. The determination of the residual mass during heating of samples of shell rock allows us to conclude that the samples have a different chemical composition.

Key words: seashell stones, porosity, temperature resistance

Известно, что структура, состав, а также свойства веществ и материалов под воздействием температуры претерпевают изменения, в некоторых случаях необратимые. Об этом можно судить, например, по изменению агрегатного состояния, по экспериментальным данным подтверждающим переход из одной аллотропной модификации в другую, при потере массы в результате испарения воды или термического разложения веществ, сопровождающегося выделением газообразных продуктов и т.д.

Таким образом, для каждого вещества и материала существует определенный температурный интервал, характеризующий неизменностью структуры, состава и свойств. Однако, в действительности температуры хранения и эксплуатации веществ (материалов) могут принимать критические значения, достижение которых будет приводить к фатальным изменениям,

делающим невозможным дальнейшее или повторное использование веществ (материалов). Это и определяет научную ценность исследований, направленных на изучение поведения веществ и материалов под воздействием температуры.

Объектами исследования в настоящей работе являются камни ракушечника М-15, М-25, М-35, добываемые на территории Республики Крым, и их поведение в условиях повышенной температуры. Выбор образцов обусловлен, с одной стороны, их доступностью при приобретении покупателями материалов, используемых в строительстве, исходя из соображений стоимости, и возможностью использования натуральных природных материалов, ввиду их экологической чистоты и безопасности.

Внешний вид исследуемых образцов приведен на рис. 1.

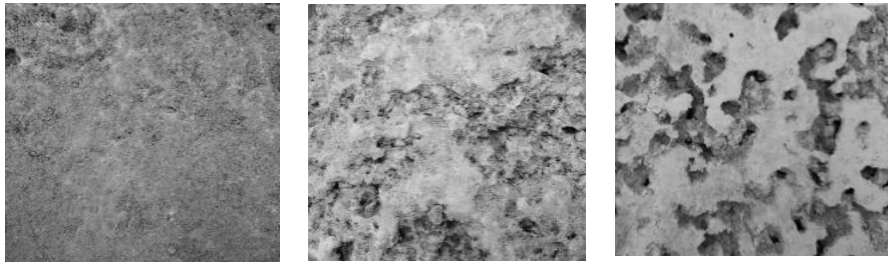


Рис. 1. Внешний вид фрагмента исследуемых образцов камней ракушечника М-15, М-25, М-35 (слева направо)

Ранее нами [1] отмечалось, что теплопроводность (λ) образцов камней ракушечника увеличивается в последовательности М-15 (0,28) < М-25 (0,60) < М-35 (0,85). В таком же ряду уменьшается их пористость. Описание зависимости $\lambda = f(\rho)$ линейной функцией (рис. 2) дает достаточно высокую величину достоверности аппроксимации, что позволяет говорить о корреляции значений теплопроводности исследуемых образцов и их средней плотности.

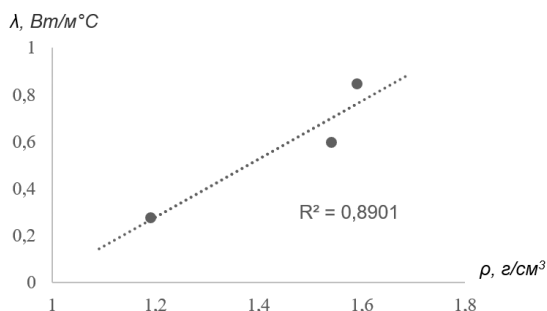


Рис. 2. Зависимость теплопроводности исследуемых образцов камней ракушечника от значений их средней плотности

Исследование процесса термического поведения образцов камней ракушечника производили методом синхронного термического анализа, позволяющего совместить термогравиметрический анализ и дифференциальную сканирующую калориметрию. Эксперимент выполняли на термическом анализаторе Setsys Evolution 16 в интервале температур 70–1050 °С в азотно-кислородной атмосфере. Содержание кислорода в газовой среде составляло ~ 20 %, что обеспечивало имитацию процесса, протекающего в воздухе. Скорость нагрева составляла 5 °С/мин.

Экспериментальные данные приведены на рис. 3–7. Воспроизводимость результатов проверялась проведением серии трех-четырёх параллельных испытаний для каждого образца.

ТГ-кривые всех образцов камней ракушечника (рис. 3) до температуры ~ 275 °С совпадают. Выше этой температуры ТГ-кривая камня ракушечника М-35 располагается несколько ниже ТГ-кривых камней ракушечника М-15 и М-25, практически накладывающихся друг на друга до достижения температуры ~ 800 °С. Исходя из данных рис. 3, можно оценить примерные значения интервала

температур, в котором происходит разложение образцов. Так температура начала термического разложения камня ракушечника М-35 составляет ~ 700 °С, а для камней ракушечника М-15 и М-25 она немного выше (~ 730 °С). Температура окончания процесса термического разложения минимальна для камня ракушечника М-35 (~ 860 °С), максимальна – для М-15 (~ 890 °С), промежуточное значение принимает для М-25 (~ 880 °С).

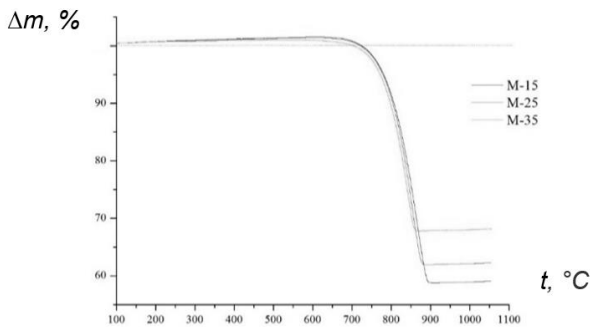


Рис. 3. ТГ-кривые образцов камней ракушечника

Величина потери массы образцов растет в ряду М-35 < М-25 < М-15. В таком же ряду происходит увеличение пористости. Полученные данные согласуются с результатами работы [2]. Авторы отмечают, что образцам с более высокой пористостью соответствует большая потеря массы при нагреве до 1000 °С. Пористость материала отражает степень заполнения его объема порами. Неоднородная пористая микроструктура камня ракушечника предполагает наличие изолированных и связанных между собой пор. При нагревании воздух в порах расширяется, создавая при этом дополнительное внутреннее давление, что, вероятно, способствует большему разрушению материала.

ТГ-кривые, приведенные на рис. 3, имеют одну ступень, что дает возможность на данном этапе говорить о протекании только одного процесса разложения. Основным компонентом камня ракушечника – известняк, термический распад которого описывается следующей химической реакцией:



Повышение температуры будет приводить к увеличению скорости эндотермического процесса.

Различия в значениях остаточной массы исследуемых образцов и в их поведении

при нагревании определяются количеством примесей в камнях ракушечника. Очевидно, что при одинаковом химическом составе исследуемых образцов характеристики ТГ-кривых были бы практически одинаковы, поскольку используемые методы исследования учитывают именно химический состав материала, а не его структуру. Логично сделать предположение, что образцы камней ракушечника имеют отличающийся химический состав. Это могут быть вещества, не разлагающиеся в изученном температурном интервале, но влияющие на физико-механические и прочностные свойства камней ракушечника.

На рис. 4 обобщены ДТГ-кривые, отражающие скорость убыли массы исследуемых образцов.

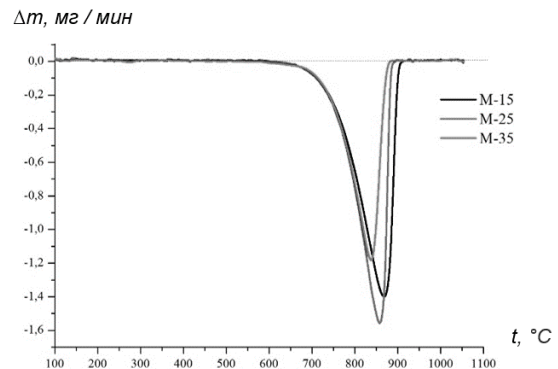


Рис. 4. ДТГ-кривые образцов камней ракушечника

Из данных, приведенных на рис. 5–7, следует, что температура максимальной убыли массы составляет 838,59 °С, 860,32 °С и 867,12 °С для камней ракушечника М-35, М-25, М-15 соответственно. Максимальная скорость убыли массы, соответствующая пикам на ДТГ-кривых, для образцов М-35, М-25 и М-15 принимает следующие значения 1,18 мг/мин, 1,59 мг/мин, 1,40 мг/мин.

Интервалы термического разложения для камней ракушечника М-15, М-25, М-35 составляют 150, 160 и 160 °С соответственно. Чем шире эти границы, тем ниже скорость убыли массы исследуемых образцов.

Наличие эндотермических пиков на рис. 5–7 указывает на то, что при нагреве до температуры 1000 °С происходит разрушение камней ракушечника, в ходе которого можно выделить два (образцы М-15, М-25) или три (образец М-35) различных процесса. Последнее еще раз указывает на отличия в химическом составе образцов.

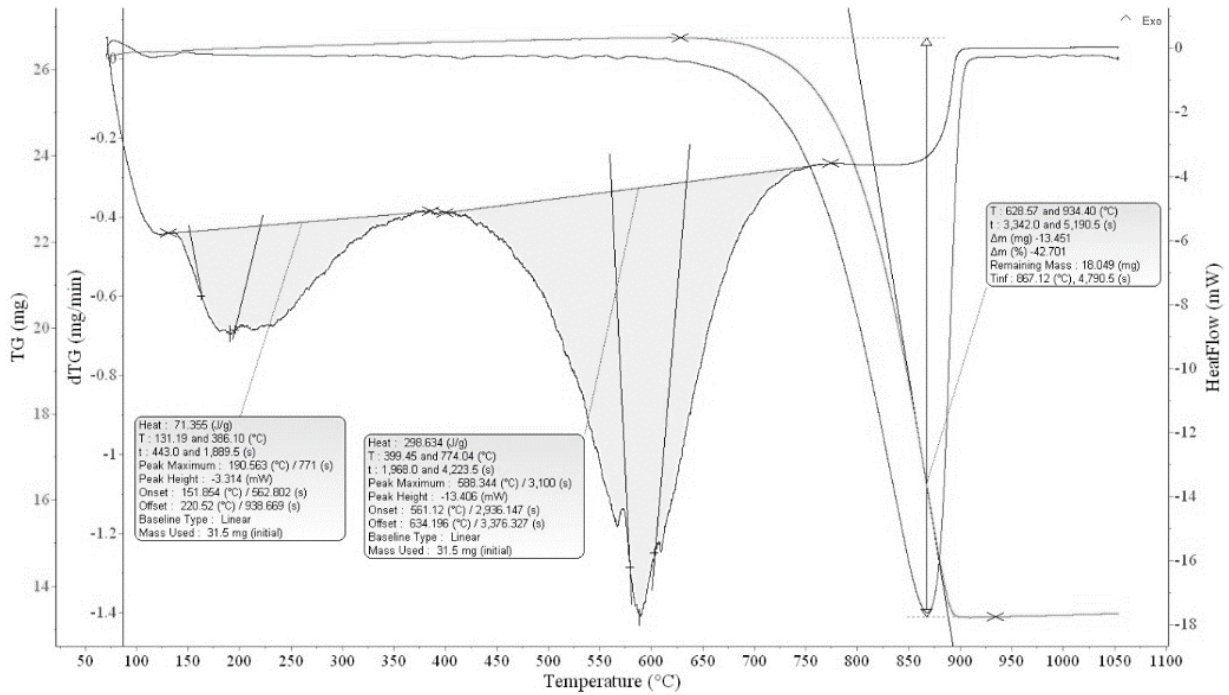


Рис. 5. Результаты синхронного термического анализа образца камня ракушечника М-15

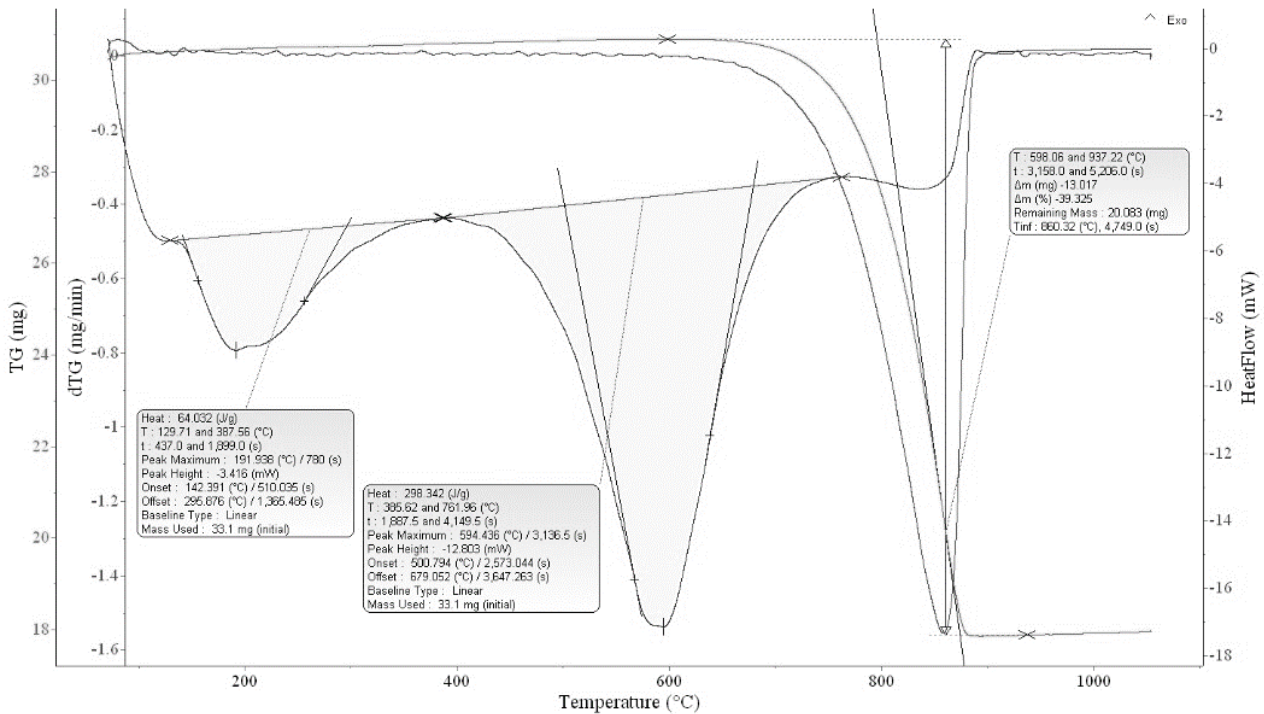


Рис. 6. Результаты синхронного термического анализа образца камня ракушечника М-25

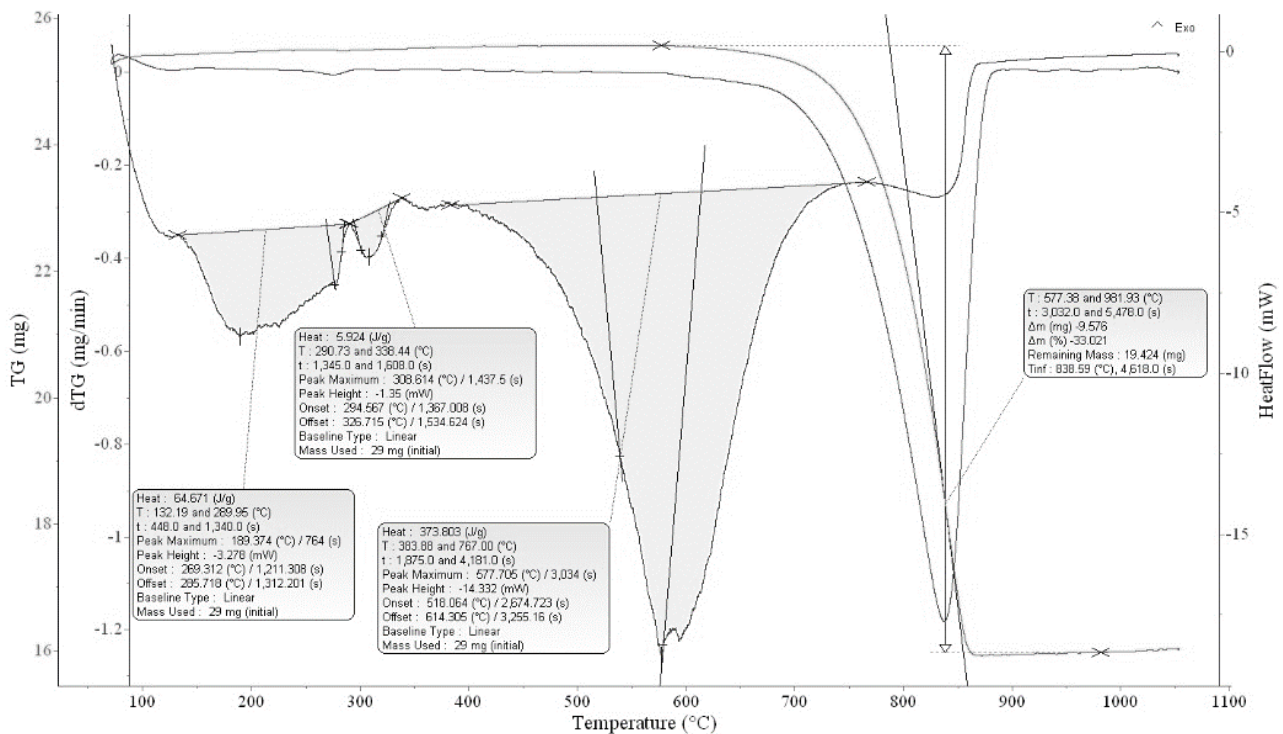


Рис. 7. Результаты синхронного термического анализа образца камня ракушечника М-35

В литературе данные о температуре начала разложения карбоната кальция несколько разнятся: в [3] приводится интервал значений 500–750 °С, а в [4] указывается значение температуры 600 °С и выше. В литературе [5] отмечено, что на температуру разложения природных карбонатов кальция оказывает влияние их степень дисперсности. Полное разложение карбоната кальция происходит при температуре ~ 900 °С [6]. Крайние пики с правой стороны на ДТГ-кривых (рис. 5–7), по всей видимости, характеризуют именно процесс разложения карбоната кальция.

Уменьшение массы образцов, наличие эндотермических пиков в интервале температур 130–390 °С, скорее всего, связано с удалением воды, которая, например, в случае карбонатного сырья может быть и свободной, и адсорбированной [7], с разложением примесей. Так, результаты химического анализа [8] показывают, что содержание карбоната кальция в камнях ракушечников может достигать значения 98 %, остальное – примеси, поэтому химический состав камней ракушечников отличается.

Таким образом, процесс термического разложения камней ракушечника определяется реакцией разложения основного компонента – карбоната кальция. Продуктом реакции

является оксид кальция, имеющий рыхлую пористую структуру. Как было отмечено ранее, различия в остаточной массе образцов камней ракушечника после воздействия температур до 1050 °С можно объяснить присутствием веществ, неразлагаемых при данных температурах.

Согласно литературным данным [4], оксид кальция характеризуется малой теплопроводностью, поэтому на поверхности образцов камней ракушечника может создаваться теплозащитный слой, затрудняющий дальнейший прогрев материала в глубину. Воздействие повышенных температур приводит к разрушению камней ракушечника, которое носит необратимый характер. Повышение температуры сначала приводит к некоторому увеличению прочности материала, а при достижении температуры ~ 600 °С – ее снижению.

О потере прочности исследуемых образцов камней ракушечника можно судить по величине потери массы исследуемых образцов. В реальных условиях при нагревании блоков из камней ракушечника данная зависимость может отличаться от прямопропорциональной, например, из-за наличия микротрещин, неоднородности материала, неравномерности прогрева и т.д. Можно предположить, что большую устойчивость к действию температуры будет иметь образец, который медленнее теряет

массу. Результаты, полученные нами ранее [1], и сравнительный анализ кривых (рис. 4) показывают, что образец камня ракушечника М-35 при температурном воздействии характеризуется меньшей потерей массы и, вероятно, прочностью. По всей видимости, в условиях повышенных температур (и в условиях пожара) самым устойчивым к разрушению будет камень ракушечник М-35, а наименее устойчивым – камень ракушечник М-15. Устойчивость образцов каменной ракушечника к действию повышенных температур, вероятно, определяется скоростью их

разложения. Повышение температуры начала термического разложения в случае камня ракушечника М-15 не приводит к увеличению способности противостоять воздействию температуры. При этом образец камня ракушечника М-15 будет обладать более высокими теплоизолирующими свойствами, что немаловажно для предотвращения распространения тепла в условиях пожара. Это объясняется, в том числе его более высокой пористостью по сравнению с другими исследуемыми образцами.

Список литературы

1. Гессе Ж. Ф., Фролова Т. В., Шабунин С. А. Оценка устойчивости природных материалов, используемых при строительстве объектов защиты, к воздействию опасных факторов пожара // *Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции*. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. С. 87–90.

2. Гуняев Г. М., Гофин М. Я. Углерод-углеродные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S1. С. 62–90.

3. Особенности поведения при обжиге композиций из кальций- и кремнеземсодержащего сырья / Р. А. Арискина, К. А. Арискина, А. Р. Валимухаметова [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. Т. 20. № 6. С. 23–25.

4. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре / В. Н. Демехин, И. Л. Мосалков, Г. Ф. Плюснина [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. 656 с.

5. Табунщиков Н. П. Производство извести. М.: «Химия». 1974. 240 с.

6. Монастырев А. В. Производство извести. М.: «Высшая школа». 1971. 272 с.

7. Питак И. В., Шаповров В. П., Васильев М. И. Исследование процесса термического разложения мелкодисперсного карбонатного сырья и некоторых свойств продукта обжига // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. Т. 5. № 4 (25). С. 49–56.

8. Мещеряков С. В., Потулов О. Е. Известняк-ракушечник Мангышлака и Устюрта. Издательство «Наука» Казахской ССР. 1974. 93 с.

zashchity, k vozdeystviyu opasnykh faktorov pozhara [Assessment of the resistance of natural materials used in the construction of protection facilities to the effects of fire hazards]. *Sovremennye požarobezopasnye materialy i tekhnologii: sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Ivanovo, Ivanovskaya požarno-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2025, pp. 87–90.

2. Gunyaev G. M., Gofin M. Ya. Uglерod-uglerodnye kompozicionnye materialy [Carbon-carbon composite materials]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2013, issue S1, pp. 62–90.

3. Osobennosti povedeniya pri obzhige kompozicij iz kal'cij- i kremnezemsoderzhashchego syr'ya [Features of behavior during firing of calcium- and silica-containing raw materials] / R. A. Ariskina, K. A. Ariskina, A. R. Valimukhmetova [et al.]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, issue 6, pp. 23–25.

4. Zdaniya, sooruzheniya i ikh ustojchivost' pri pozhare [Buildings, structures, and their fire resistance] / V. N. Demekhin, I. L. Mosalkov, G. F. Plyusnina [et al.]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2003. 656 p.

5. Tabunshchikov N. P. *Proizvodstvo izvesti* [Lime production]. Moscow: «Khimiya», 1974. 240 p.

6. Monastyrev A. V. *Proizvodstvo izvesti* [Lime production]. Moscow: «Vysshaya shkola», 1971. 272 p.

7. Pitak I. V., Shaporev V. P., Vasil'ev M. I. Issledovanie processa termicheskogo razlozheniya melkodispersnogo karbonatnogo syr'ya i nekotorykh svojstv produkta obzhiga [Study of the process of thermal decomposition of fine-grained carbonate raw materials and some properties of the firing product]. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 2015, vol. 5, issue 4 (25), pp. 49–56.

8. Meshcheryakov S. V., Potulov O. E. *Izvestnyak-rakushechnik Mangyshlaka i Ustyurta* [Limestone-shell rock of Mangyshlak and Ustyurt]. Izdatel'stvo «Nauka» Kazakhskoj SSR, 1974. 93 p.

References

1. Gesse Zh. F., Shabunin S. A., Frolova T. V. Ocenka ustojchivosti prirodnykh materialov, ispol'zuemykh pri stroitel'stve ob'ektov

Гессе Женни Фердинандовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры

E-mail: zhenni.gesse@mail.ru

Gesse Zhenni Ferdinandovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of chemical sciences, senior lecturer

E-mail: zhenni.gesse@mail.ru

Шабунин Сергей Александрович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат химических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса «Государственный надзор»

E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Shabunin Sergey Aleksadrovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of chemical sciences, Research Associate of Research Department of Educational and Scientific Complex «State Supervision»

E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Фролова Татьяна Владиславовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры

E-mail: frolovatanja@mail.ru

Frolova Tatiana Vladislavovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of Chemical Sciences, senior lecturer

E-mail: frolovatanja@mail.ru

УДК 614.8.084:621.355.9
DOI 10.48612/ntp/43m3-mzek-2ar3

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В. Е. ГОРСКИЙ, А. М. БАУСОВ, В. А. КОМЕЛЬКОВ, Д. В. СОРОКИН, А. С. МИТРОФАНОВ

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: aquablastt@yandex.ru, ambausov@yandex.ru, komelkov@rambler,
element_37@mail.ru, mitart1992@mail.ru

В статье проведен анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), являющихся ключевым элементом современной энергетики и транспорта. На основе анализа статистических данных выявлен экспоненциальный рост числа пожаров, связанных с ЛИА, с выделением наиболее уязвимых сегментов. Рассмотрены конструктивные особенности и электрохимические системы ЛИА, определяющие их энергетический потенциал и термическую стабильность. Подробно рассмотрен механизм теплового разгона, как каскада экзотермических реакций, инициируемого механическими, электрическими, термическими воздействиями или производственными дефектами. Проведен обзор международной и отечественной нормативно-правовой базы, выявлены существенные пробелы, особенно в области противопожарного регулирования жизненного цикла устройств с ЛИА. Сделан вывод о необходимости разработки комплексных инженерных и нормативных мер для минимизации рисков возникновения пожаров ЛИА.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, пожарная безопасность, тепловой разгон, статистика пожаров, электрохимическая система.

FIRE HAZARD OF LITHIUM-ION BATTERIES

V. E. GORSKY, A. M. BAUSOV, V. A. KOMELKOV, D. V. SOROKIN, A. S. MITROFANOV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: aquablastt@yandex.ru, ambausov@yandex.ru, komelkov@rambler,
element_37@mail.ru, mitart1992@mail.ru

The article presents an analysis of the fire hazard associated with lithium-ion batteries (LIBs), which are a key component in modern energy systems and transportation. Based on an analysis of statistical data, an exponential increase in the number of fires involving LIBs has been identified, highlighting the most vulnerable segments. The design features and electrochemical systems of LIBs that determine their energy potential and thermal stability are examined. The mechanism of thermal runaway, understood as a cascade of exothermic reactions initiated by mechanical, electrical, thermal abuse, or manufacturing defects, is discussed in detail. A review of the international and Russian regulatory framework is conducted, revealing significant gaps, particularly in the field of fire safety regulations governing the life cycle of devices containing LIBs. The conclusion underscores the necessity of developing comprehensive engineering and regulatory measures to minimize the risks of LIB-related fires.

Keywords: Lithium-ion battery, fire safety, thermal runaway, fire statistics, electrochemical system.

Литий-ионные аккумуляторы совершили технологическую революцию, став доминирующим источником энергии для мобильных устройств, электрического транспорта и систем хранения энергии, благодаря рекордной удельной энергоёмкости и высокому энергетическому КПД [1]. Однако обратной стороной их выдающихся характеристик является значительная

пожарная опасность, обусловленная свойствами применяемых электрохимических материалов. Высокий энергетический потенциал, запасённый в химически активной форме, при нарушении условий эксплуатации или наличии дефектов может высвобождаться неконтролируемо в форме самоускоряющегося экзотермического процесса – теплового разгона [2].

Увеличивающаяся повсеместная интеграция ЛИА в критически важные инфраструктуры обуславливает актуальность всестороннего анализа связанных с ними рисков.

Целью данной работы является систематизация знаний о проблемах пожарной опасности ЛИА на основе анализа статистики отказов, изучения конструктивных и электрохимических особенностей, механизмов возникновения опасных процессов и оценки адекватности нормативной базы для снижения пожарной опасности ЛИА.

Статистические данные подтверждают прямую корреляцию между ростом парка устройств с ЛИА и увеличением числа связанных с ними пожаров. Согласно отчетам ведущих международных организаций, ежегодный прирост таких инцидентов в глобальном масштабе составляет 20–25 % [3]. В Российской Федерации наблюдается аналогичная тенденция. Так в период 2018–2023 гг. количество бытовых пожаров в России, инициированных ЛИА, возросло более чем в 7 раз [4].

Бытовая и офисная электроника (40–45 % случаев): для смартфонов, ноутбуков и особенно электронных сигарет характерны локальные, но интенсивные возгорания, часто происходящие в процессе зарядки. Ключевыми факторами риска являются: использование несертифицированных зарядных устройств, механические повреждения и нарушение температурного режима [5].

Средства индивидуальной мобильности (20–25 %): электросамокаты и гироскутеры демонстрируют наиболее резкий рост числа инцидентов. Пожары связаны с низким качеством сборки батарейных блоков, отсутствием эффективного контроля температуры в BMS (Battery Management System) и нарушениями правил эксплуатации [6].

Электромобили (15–20 %): несмотря на статистически меньшую вероятность пожара на одно транспортное средство по сравнению с автомобилями с ДВС, последствия характеризуются высокой скоростью развития, сложностью тушения и выбросом высокотоксичных газов (HF, CO) [7, 8].

Системы хранения энергии (10–15 %): инциденты, хотя и редки, приводят к максимальным материальным потерям из-за неэффективности традиционных систем пожаротушения против каскадного теплового разгона в массивах из тысяч ячеек [9].

Пожарная опасность ЛИА обусловлена их многоуровневой конструкцией и свойствами компонентов. Иерархия системы включает элемент (ячейку), модуль и батарейный блок, оснащенный системой управления BMS и термического контроля TMS (Thermal Management

System). BMS играет критическую роль в предотвращении опасных состояний, таких как перезаряд, переразряд и перегрев [10].

Литий-ионные аккумуляторы состоят из электродов (катода и анода), которые разделены сепаратором с электролитом. Электроды располагаются в герметичном корпусе, который может быть оснащен предохранительным клапаном, сбрасывающим внутреннее давление при аварийных режимах работы.

Литий-ионные аккумуляторы различаются по типу используемого катодного материала. Катод (положительный электрод) является источником ионов лития в литий-ионном аккумуляторе и во многом определяет его ключевые характеристики: напряжение, удельную энергоемкость, срок службы и стоимость. В процессе разряда ионы лития перемещаются из катода в анод, а при заряде – в обратном направлении. Помимо электрохимических характеристик, структурная и термическая стабильность катодного материала выступают критическими факторами безопасности ЛИА. Экзотермическое разложение катода при перегреве с выделением кислорода служит основным источником энергии, питающим тепловой разгон и последующее горение [11]. Таким образом, выбор и разработка катодного материала представляют собой поиск компромисса между высокой энергетической плотностью и минимальной склонностью к опасному термическому разложению.

Катодный материал выступает центральным звеном, определяющим не только энергетический потенциал, но и пожарную опасность литий-ионного аккумулятора.

В зависимости от химического состава и устройства литий-ионные аккумуляторы разделяются на типы:

- литий-марганцевый аккумулятор (LMO);
- литий-кобальтовый аккумулятор (LCO);
- литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный аккумулятор (NCA);
- литий-никель-марганец-кобальт-оксидный аккумулятор (NMC);
- литий-железо-фосфат аккумулятор (LFP);
- литий-титанатный аккумулятор (LTO) и др.

Наиболее распространенный катодный материал в литий-ионных элементах – это кобальтит лития [12, 13]. Однако используются различные другие материалы, такие как литий-железо-фосфат, литий-марганцевая шпинель или смешанные оксиды металлов, которые включают кобальт, никель, алюминий и оксиды марганца, такие как никель-кобальт-алюминий и никель-марганец-кобальт.

Наибольший интерес для силовых установок транспортных средств в настоящее

время представляют LFP-аккумуляторы и аккумуляторы NMC.

Ключевое значение имеет электрохимическая система, в частности, материал катода:

LCO – высокая удельная энергия при низкой термической стабильности;

LFP – высокая термическая и химическая стабильность при меньшей энергоёмкости;

NMC, NCA – обеспечивают наибольшую энергоёмкость, но обладают повышенной склонностью к термическому разгону с выделением кислорода при нагреве [14].

Анод является важным компонентом ЛИА, принимающим ионы лития при заряде и отдающим их при разряде. От его способности к быстрой и обратимой интеркаляции/деинтеркаляции лития, стабильности и безопасности зависят общие характеристики батареи.

Исторически развитие ЛИА началось с замены металлического лития на материалы, интеркалирующие литий, что позволило резко повысить безопасность [15]. Современная эволюция анодов направлена на преодоление основного ограничения графита – относительно низкой теоретической удельной ёмкости и решение присущих ему проблем деградации. При этом любое изменение анодного материала напрямую влияет на стабильность пассивирующего анодного слоя, кинетику электродных процессов и, как следствие, на склонность элемента к тепловому разгону.

Отрицательный электрод литий-ионного элемента состоит из соединения с интеркалированным литием, покрывающим тонким слоем металл (в основном медную фольгу). Наиболее распространённым анодным материалом является какая-либо форма углерода, обычно графит в порошковой форме, в сочетании со связующим материалом. Свойства углерода может значительно варьироваться в зависимости от происхождения графита (естественный или синтетический), от чистоты и размера частиц, от распределения размера и формы частиц, кристаллической фазы углерода и т.д.

Материалы анодов, состоящие из кремния, германия и титаната также изготавливались и испытывались, но в настоящее время применяются редко.

Анод в литий-ионном аккумуляторе – это не просто пассивный накопитель лития, а динамичный и сложный компонент, от свойств которого напрямую зависят энергетическая плотность, срок службы и безопасность системы. Графит, благодаря сбалансированному набору свойств и стабильному пассивирующему анодному слою, остаётся безусловным лидером для большинства ЛИА, однако его ограниченная ёмкость стимулирует поиск альтернатив. Внедрение высокоёмкостных материалов, прежде всего кремния, требует

преодоления фундаментальных проблем, связанных с объёмным расширением и стабилизацией межфазной границы. Понимание процессов на аноде, особенно механизмов деградации пассивирующего анодного слоя и роста дендритов, имеет решающее значение для разработки как более энергоёмких, так и более безопасных аккумуляторов. Будущие разработки будут связаны с созданием сложных композитных и наноструктурированных анодов, интеллектуальных электролитных добавок для формирования стабильного пассивирующего анодного слоя и, возможно, с коммерциализацией анодов с совершенно новыми механизмами работы (например, на основе реакций замещения).

Пожарная опасность литий-ионных батарей заключается в том, что применяемые в их составе электролиты на органической основе являются легковоспламеняющимися. ЛИА могут подвергаться тепловому разгону, что приводит к значительному тепловыделению, взрывной разгерметизации внешней металлической оболочки аккумулятора и возникновению форса пламени, температура которого может превышать 1000 °C [16].

Электролит в литий-ионном аккумуляторе выполняет критическую функцию ионного проводника между катодом и анодом, обеспечивая перенос ионов лития в процессе заряда и разряда. В отличие от электродов, он не участвует в накоплении энергии, но его свойства напрямую определяют кинетику электрохимических процессов, рабочий температурный диапазон, срок службы и, что наиболее важно, безопасность элемента. Современные коммерческие ЛИА используют легковоспламеняющиеся жидкие органические электролиты, что создаёт фундаментальный парадокс: компонент, без которого работа батареи невозможна, одновременно является основным горючим материалом и источником экзотермических реакций при тепловом разгоне [17].

Электролит в литий-ионном аккумуляторе выступает в роли транспортной системы, обеспечивающей ионный перенос, и горючей нагрузки, определяющей тяжесть последствий при тепловом разгоне. Органические карбонатные системы, оптимизированные десятилетиями исследований, обеспечивают высокие электрохимические показатели, но их принципиальная воспламеняемость и термическая нестабильность представляют собой фундаментальное ограничение для повышения безопасности, особенно в ЛИА с высокой плотностью энергии. Переход к твердотельным электролитам является наиболее радикальным и перспективным решением, обещающим прорыв как в безопасности, так и в энергоёмкости. Однако технологические барьеры, связанные с интерфейсным сопротивлением и масштабированием

нием производства, пока сдерживают их коммерциализацию. В среднесрочной перспективе развитие будет идти по пути создания «умных» жидких электролитов – негорючих, саморегулирующихся и обеспечивающих формирование сверхстабильных межфазных слоев, что

позволит максимально раскрыть потенциал существующих и новых электродных материалов.

Основные виды и пожарно-технические характеристики компонентов электролитов приведены в таблице [18].

Таблица. Основные виды и пожарно-технические характеристики компонентов электролитов литий-ионных аккумуляторов

Компонент электролита	Хим. формула	Темп. плавления, °С	Темп. кипения, °С	Темп. вспышки, °С	Темп. самовоспламенения, °С	Теплота сгорания, кДж/мл
Пропиленкарбонат (PC)	C ₄ H ₆ O ₃	- 49	242	135	455	-20,1
Этиленкарбонат (EC)	C ₃ H ₄ O ₃	36	248	145	465	-17,2
Диметилкарбонат (DMC)	C ₃ H ₆ O ₃	2	91	18	458	-15,9
Диэтилкарбонат (DEC)	C ₅ H ₁₀ O ₃	-43	126	25	445	-20,9
Этил метил карбонат (EMC)	C ₄ H ₈ O ₃	-14	107	25	440	-

Горючий жидкий электролит на основе органических карбонатов с низкой температурой вспышки (~16–18 °С) и полимерный сепаратор с низкой температурой плавления (~130–165 °С) являются дополнительными источниками уязвимости. Расплавление сепаратора приводит к внутреннему короткому замыканию – ключевому триггеру теплового разгона [19, 20].

Сепаратор является пассивным, но одним из наиболее важных компонентов литий-ионного аккумулятора, выполняющим одновременно механическую, электрохимическую и барьерную функции. Его надежность и стабильность напрямую определяют безопасность, производительность и срок службы батареи. Основная задача сепаратора – предотвратить физический контакт между катодом и анодом (и, как следствие, прямое электрическое короткое замыкание), обеспечивая при этом свободный перенос ионов лития через поры, заполненные электролитом [21]. Несостоятельность сепаратора при термических, механических или электрических воздействиях часто служит ключевым триггером каскада опасных процессов, ведущих к тепловому разгону и пожару [22].

Современные сепараторы для ЛИА представляют собой микропористые мембраны, изготавливаемые преимущественно из полиолефинов методом сухого или мокрого растяжения.

Ключевыми характеристиками сепаратора являются: толщина, пористость, размер пор, проницаемость, механическая прочность

на разрыв и, что критически важно, термическая стабильность (сопротивление усадке при нагреве) [23].

Полное расплавление сепаратора вызывает прямой контакт катода и анода, что приводит к мгновенному, мощному внутреннему короткому замыканию. Выделяющееся при этом тепло служит мощным источником нагрева, резко ускоряющим последующие стадии теплового разгона: разложение катода с выделением кислорода и воспламенение электролита [22, 24].

Таким образом, температура плавления сепаратора является одним из ключевых пороговых параметров в каскаде экзотермических реакций теплового разгона. Снижение этого порога, например, при механическом повреждении мембраны или локальном перегреве, существенно повышает вероятность необратимого развития аварии.

Сепаратор, будучи тонкой полимерной мембраной, играет критическую роль в обеспечении как нормальной работы, так и безопасности литий-ионного аккумулятора. Низкая термическая стабильность стандартных полиолефиновых сепараторов делает их слабым звеном, расплавление которого является ключевым фактором развития теплового разгона.

Тепловой разгон представляет собой необратимый самоускоряющийся процесс, инициируемый при превышении порога тепловыделения над возможностями теплоотвода. Каскад экзотермических реакций развивается в последовательности: разложение пассивирующего анодного слоя, реакция лития с электролитом, плавление сепаратора и внутреннее короткое

замыкание, разложение катода с выделением кислорода, разложение электролита и горение [14]. В батарейном блоке тепловой разгон одной ячейки может распространяться на соседние.

Основные причины и схема развития пожароопасной ситуации подробно изложены в работе [25].

Как видно из схемы (рис. 1) дефекты производства и внешние механические повреж-

дения, а также образование дендритов (ионы лития, осаждаемые на аноде и образующие древовидные структуры) приводят к внутреннему короткому замыканию. В результате перезаряда или внешнего нагрева происходит тепловой разгон аккумулятора. Процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов схематично представлен на (рис. 2). [25]



Рис.1. Схема возможных причин возгорания литий-ионных аккумуляторов

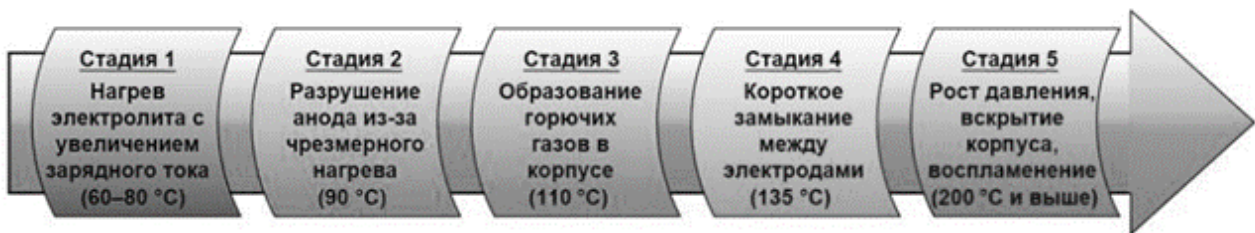


Рис. 2. Процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов

Ряд исследований [26, 27], основанных на измерениях тепловой стабильности катодных материалов с электролитом в условиях полного напряжения заряда показал, что катодные материалы начинают вступать в экзотермическую реакцию с электролитом при температурах от 130 до 250 °С. Однако анод начинает реагировать экзотермически при более низких температурах, кроме этого, существует большая вероятность возникновения короткого замыкания в элементе из-за его строения и внутренних производственных дефектов.

Наиболее легковоспламеняющимся компонентом литий-ионного элемента является электролит на основе углеводородов. При этом даже полностью разряженные литий-ионные элементы содержат ощутимую химическую энергию, которая может высвободиться в результате сгорания электролита [10]. Разгерметизация литий-ионных элементов высвобождает легковоспламеняющиеся пары и приводит к высвобождению легковоспламеняющегося электролита, что увеличивает общее тепловыделение пожара. Другие горючие компоненты литий-ионного элемента включают

полимерный сепаратор, а также различные связующие вещества, используемые в электродах, и графит анода. Некоторые из этих компонентов разлагаются, если элемент подвергается термическому разгону, и из него выделяются легковоспламеняющиеся газы. Литий-ионные элементы не содержат металлического лития в каком-либо значительном количестве; в литий-ионных элементах ионы Li⁺ функционируют просто как носители электрического заряда.

Высокая плотность энергии и чувствительность литий-ионных аккумуляторов к условиям эксплуатации делают невозможной их безопасную и эффективную работу без сложных систем контроля и управления. В отличие от отдельных ячеек, батарейный блок требует координации работы десятков или сотен элементов. Для этого служат две взаимосвязанные системы: BMS и TMS. BMS отвечает за электрохимическое состояние батареи, непрерывно отслеживая напряжение, ток и температуру, оценивая ключевые параметры состояния и предотвращая работу в опасных режимах [28]. TMS контролирует температуру, отводя избыточное тепло при работе и подогревая батарею при низких температурах окружающей среды [29]. Их совместная и скоординированная работа является краеугольным камнем обеспечения безопасности, особенно в контексте предотвращения самоускоряющегося процесса теплового разгона.

BMS представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий интеллектуальное управление батареями.

Оптимальный температурный диапазон для большинства ЛИА лежит в пределах 15–35 °С. Отклонения ведут к ускоренной деградации (выше 45 °С) или резкому падению мощности и риску повреждения литиевого покрытия (ниже 0 °С) [30]. TMS решает эту проблему.

Безопасность ЛИА обеспечивается именно взаимодействием BMS и TMS, формирующим многоуровневую систему защиты.

BMS и TMS трансформируют набор электрохимических ячеек в предсказуемую, безопасную и управляемую энергетическую систему. BMS обеспечивает интеллектуальный контроль и диагностику, в то время как TMS создает необходимые физические условия для стабильной работы. Их интеграция является обязательным условием для надежного применения ЛИА в ответственных областях, таких как электромобили и системы хранения энергии сетевого масштаба.

Бурное распространение литий-ионных технологий во всех сферах жизни опередило формирование адекватной и целостной нормативно-правовой системы, обеспечивающей их пожарную безопасность. Нормативная экосистема развивается по «догоняющему» сценарию, реагируя на уже произошедшие инциденты, а не проактивно формируя рамки для новых рисков [31]. Это приводит к существованию значительных пробелов, особенно в регулировании этапов эксплуатации, хранения и утилизации, где происходит большинство пожаров. Актуальность системного анализа нормативной базы обусловлена необходимостью трансформации разрозненных, часто добровольных стандартов в связную систему обязательных противопожарных требований, способных минимизировать растущие риски.

Нормативно-правовое поле в области пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторов характеризуется значительным отставанием от темпов технологического внедрения. На международном уровне сформирован базис в виде стандартов на компоненты (IEC 62133), промышленные батареи (IEC 62619), правила перевозки (UN 38.3) и стандарты для электромобилей (ECE R100, строгий китайский GB 38031) [32].

В Российской Федерации и ЕАЭС регулирование фрагментировано. Технические регламенты (ТР ТС 004/2011, 018/2011) носят общий характер. Происходит гармонизация национальных стандартов (ГОСТ) с требованиями МЭК, однако их добровольный статус снижает эффективность¹. Выявлен критический нормативный пробел – отсутствие специализированных противопожарных требований в сводах правил, регламентирующих:

- проектирование и оборудование зарядной инфраструктуры;
- условия хранения и складирования устройств с ЛИА;
- порядок эксплуатации, диагностики, ремонта и утилизации аккумуляторов.

Неразвитость инфраструктуры для безопасной утилизации ЛИА, отнесенных к опасным отходам, создает дополнительные риски [33].

Только переход от фрагментарного регулирования компонентов к целостной системе управления рисками на протяжении всего жизненного цикла позволит сдерживать негативный тренд роста числа пожаров, связанных с литий-ионными технологиями.

¹ Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неподкисленные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи

литиевые для портативного применения: ГОСТ IEC 62133-2022. Введ. 2023-06-01.

Выводы

Выполненный анализ литературных данных позволил сформировать системное представление о природе и масштабе пожарной опасности, присущей литий-ионным аккумуляторам (ЛИА). Эмпирические данные однозначно свидетельствуют о трансформации данного риска из теоретического в актуальный и статистически значимый, с ежегодным ростом числа инцидентов на 20-25 %. Наиболее уязвимыми сегментами, формирующими основной массив происшествий, являются средства индивидуальной мобильности и бытовая электроника, что обусловлено массовостью их применения, не всегда удовлетворительным качеством сборки и частыми нарушениями условий эксплуатации.

Установлено, что пожарная опасность заложена в физико-химических свойствах ключевых компонентов ЛИА. Фундаментальный компромисс между высокой удельной энергоемкостью и термической стабильностью наиболее ярко проявляется в катодных материалах: высокоэнергетические никель-богатые составы (NMC, NCA) обладают выраженной склонностью к экзотермическому разложению с выделением кислорода, в то время как фосфат лития-железа (LFP) демонстрирует исключительную термическую стабильность, задавая новый стандарт безопасности. Горючий жидкий электролит на основе органических карбонатов и полиолефиновый сепаратор с низкой температурой плавления выступают критически важными элементами уязвимости, определяющими сценарий развития аварии.

Тепловой разгон идентифицирован как необратимый самоускоряющийся процесс, развивающийся по каскадному сценарию от разложения пассивирующего слоя на аноде и реакции интеркалированного лития до расплавления сепаратора, внутреннего короткого замыкания и термического разложения катода. Именно

последовательность этих экзотермических стадий обуславливает высокую скорость развития и разрушительные последствия пожара в ЛИА.

Анализ нормативно-правовой базы выявил ее существенное отставание от темпов технологического внедрения ЛИА. Существующая система регулирования фрагментирована и фокусируется преимущественно на безопасности компонента (ячейки, батареи) на этапах производства и транспортировки, в то время как ключевые риски реализуются на этапах эксплуатации. Отсутствие комплексных, обязательных к исполнению противопожарных требований, регламентирующих полный жизненный цикл устройств с ЛИА, является системным пробелом, требующим устранения.

Таким образом, для эффективного обеспечения пожарной безопасности ЛИА необходим переход к комплексному подходу, включающему:

1. Разработку и внедрение предиктивных математических моделей теплового разгона для различных электрохимических систем.
2. Интенсификацию исследований в области инженерных решений пассивной и активной пожарной защиты батарейных блоков, включая эффективные средства тушения.
3. Ужесточение нормативного поля, в частности, разработку специализированных сводов правил (СП) для различных сегментов применения ЛИА.
4. Формирование эффективной системы сбора, транспортировки и глубокой переработки отслуживших ЛИА как элемента противопожарной и экологической безопасности.

Только синергия научных исследований, технологических инноваций и совершенствования нормативного регулирования позволит обеспечить безопасную интеграцию литий-ионных технологий в экономику и повседневную жизнь.

Список литературы

1. Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology. ACS Central Science, 2017, vol. 3, issue 10, pp 1063–1069.
2. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang [et al.] Journal of Power Sources, 2012, vol. 208, pp. 210–224.
3. National Fire Protection Association (NFPA). Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. Quincy, 2023.
4. Пожары и пожарная безопасность в Российской Федерации: стат. сб. МЧС России за 2019–2023 гг. М.: ВНИИПО, 2023.
5. Experimental study on the thermal runaway and fire behaviors of large-format lithium ion

batteries under overcharging / M. Chen [et al.]. Applied Energy, 2021, vol. 281, Art. 116035.

6. Guidelines for Safety of E-scooter Batteries. Recharge, 2022.

7. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires / F. Larsson [et al.]. Scientific Reports, 2020, vol. 10, issue 1, Art. 21318.

8. A comparative study of early fire detection algorithms for electric vehicle battery packs / P. Sun [et al.]. Fire Safety Journal, 2022, vol. 130, Art. 103579.

9. Fire Safety for Grid-Scale Lithium-ion Battery Energy Storage Systems: white paper. NEC Corporation, 2021.

10. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu

[et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

11. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

12. Pillot C. Present and Future Market Situation For Batteries. *Proceedings, Batteries 2009*, September 30 – October 2, 2009, French Riviera. 2009.

13. Pillot C. Main Trends for Rechargeable Battery Market 2009–2020. *Proceedings, Batteries 2010*, September 29 – October 1, 2010, French Riviera. 2010.

14. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.

15. Yoshino A. The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, vol. 51, issue 24, pp. 5798–5800.

16. Мокряк А. В., Мокряк А. Ю., Мельник А. А. Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 4 (130). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>

17. Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 4303–4417.

18. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment / C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White [et al.]. *Exponent Failure Analysis Associates, Inc*, 2011, pp. 15.

19. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

20. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

21. Arora P., Zhang Z. Battery separators. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 419–4462.

22. 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, pp. 246–267.

23. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.

24. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.

25. Харламенков А. С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31, № 3. С. 96–102.

26. Jiang J., Dahn J. Electrochemical cell. *Electrochemistry Communications*, 2003, vol. 6, issue 1, pp. 39–43.

27. Reaction behavior of LiFePO₄ as a cathode material for rechargeable lithium batteries / M. Takahashi, S. Tobishima, K. Takei [et al.]. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 148, issue 3–4, pp. 283–298.

28. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu, X. Han, J. Li [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.

29. Pesaran A. A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, issue 2, pp. 377–382.

30. Influence of cell design on temperatures and temperature gradients in lithium-ion cells: an in operando study / T. Waldmann, G. Bisle, B. I. Hogg [et al.]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, vol. 162, issue 6, pp. A921–A927.

31. A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies / A. Barai [et al.]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, vol. 73, pp. 95–131.

32. Electric vehicles traction battery safety requirements: China Standard GB 38031-2020. Beijing, 2020.

33. Харламенков А. С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32, № 1. С. 89–96.

References

1. Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology. *ACS Central Science*, 2017, vol. 3, issue 10, pp 1063–1069.

2. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang [et al.] *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.

3. National Fire Protection Association (NFPA). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Quincy, 2023.

4. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v Rossiyskoy Federatsii: stat. sb. MChS Rossii za 2019–2023 gg. [Fires and fire safety in the Russian Federation: statistical digest of the Ministry of Emergency Situations of Russia for 2019–2023]. Moscow: VNIPO, 2023.

5. Experimental study on the thermal runaway and fire behaviors of large-format lithium ion batteries under overcharging / M. Chen [et al.]. *Applied Energy*, 2021, vol. 281, Art. 116035.

6. *Guidelines for Safety of E-scooter Batteries*. Recharge, 2022.

7. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires / F. Larsson [et al.]. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, issue 1, Art. 21318.

8. A comparative study of early fire detection algorithms for electric vehicle battery packs /

- P. Sun [et al.]. *Fire Safety Journal*, 2022, vol. 130, Art. 103579.
9. Fire Safety for Grid-Scale Lithium-ion Battery Energy Storage Systems: white paper. NEC Corporation, 2021.
10. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.
11. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 208, pp. 210–224.
12. Pillot C. Present and Future Market Situation For Batteries. Proceedings, Batteries 2009, September 30 – October 2, 2009, French Riviera. 2009.
13. Pillot C. Main Trends for Rechargeable Battery Market 2009–2020. Proceedings, Batteries 2010, September 29 – October 1, 2010, French Riviera. 2010.
14. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng [et al.]. *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 10, pp. 246–267.
15. Yoshino A. The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, vol. 51, issue 24, pp. 5798–5800.
16. Mokryak A. V., Mokryak A. Yu., Melnik A. A. Analiz ostatkov lityi-ionnykh akkumulyatorov posle teplovogo razgona metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii [Analysis of lithium-ion battery residues after thermal runaway by scanning electron microscopy]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2023, vol. 4 (130). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>
17. Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 4303–4417.
18. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment / C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White [et al.]. Exponent Failure Analysis Associates, Inc, 2011, pp. 15.
19. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.
20. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.
21. Arora P., Zhang Z. Battery separators. *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 10, pp. 419–4462.
22. 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, pp. 246–267.
23. Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, vol. 15, issue 4, pp. 649–662.
24. Thermal runaway of Li-ion batteries: How does it happen and what are the critical parameters? / A. W. Golubkov [et al.]. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 70, pp. 57171–57186.
25. Kharlamenkov A. S. Pozharnaya opasnost' primeneniya lityi-ionnykh akkumulyatorov v Rossii [Fire hazard of using lithium-ion batteries in Russia]. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2022, vol. 31, issue 3, pp. 96–102.
26. Jiang J., Dahn J. Electrochemical cell. *Electrochemistry Communications*, 2003, vol. 6, issue 1, pp. 39–43.
27. Reaction behavior of LiFePO₄ as a cathode material for rechargeable lithium batteries / M. Takahashi, S. Tobishima, K. Takei [et al.]. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 148, issue 3–4, pp. 283–298.
28. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles / L. Lu, X. Han, J. Li [et al.]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 226, pp. 272–288.
29. Pesaran A. A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, issue 2, pp. 377–382.
30. Influence of cell design on temperatures and temperature gradients in lithium-ion cells: an in operando study / T. Waldmann, G. Bisle, B. I. Hogg [et al.]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, vol. 162, issue 6, pp. A921–A927.
31. A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies / A. Barai [et al.]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, vol. 73, pp. 95–131.
32. Electric vehicles traction battery safety requirements: China Standard GB 38031-2020. Beijing, 2020.
33. Kharlamenkov A. S. Sovremennye sposoby tusheniya lityi-ionnykh akkumulyatorov. Chast' 1 [Modern methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1]. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2023, vol. 32, issue 1, pp. 89–96.

Горский Владимир Евгеньевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

Адъюнкт адъюнктуры

E-mail: aquablastt@yandex.ru

Gorsky Vladimir Evgenievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Adjunct of post-graduate courses
E-mail: aquablastt@yandex.ru

Баусов Алексей Михайлович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
E-mail: ambausov@yandex.ru

Bausov Aleksey Mikhailovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Doctor of technical sciences, professor, associate professor
E-mail: ambausov@yandex.ru

Комельков Вячеслав Алексеевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры
E-mail: komelkov@rambler

Komelkov Vyacheslav Alekseevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»
Russian Federation, Ivanovo
Candidate of technical sciences, associate professor, head of the department
E-mail: komelkov@rambler

Сорокин Дмитрий Вячеславович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры
E-mail: element_37@mail.ru

Sorokin Dmitry Vyacheslavovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Candidate of technical sciences, deputy head of the department
E-mail: element_37@mail.ru

Митрофанов Артур Сергеевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры
E-mail: mitart1992@mail.ru

Mitrofanov Artur Sergeevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Candidate of technical sciences, senior lecturer
E-mail: mitart1992@mail.ru

УДК 614.841.41

DOI 10.48612/ntp/tgda-rb6a-2357

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИДА ИСТОЧНИКА ЗАЖИГАНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ДРЕВЕСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. КОЧЕТОВА, С. Н. УЛЬЕВА, С. А. ШАБУНИН, А. Л. НИКИФОРОВ

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: jivotjagina@mail.ru

Древесина и материалы на её основе, являются горючими материалами. При их горении происходит быстрое развитие пожара. Состав, структура, свойства, наличие огнезащитной обработки существенно влияют на поведение материала в условиях пожара. Целью работы являлось исследование поведения древесных материалов при термическом воздействии различной природы. Решение данной актуальной задачи, позволит разработать эффективные мероприятия, обеспечивающие эффективную защиту деревянных материалов от воздействия огня.

Ключевые слова: древесина, производные древесины, тепловое воздействие, воздействие пламени, термодеструкция, огнезащита.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE NATURE OF THE IGNITION SOURCE ON THE BEHAVIOR OF WOODEN BUILDING MATERIALS

A. A. KOCHETOVA, S. N. ULIEVA, S. A. SHABUNIN, A. L. NIKIFOROV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education

«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

E-mail: jivotjagina@mail.ru

Wood and wood-based materials are combustible materials. When they burn, the fire develops rapidly. The composition, structure, properties, and presence of fire protection treatment significantly affect the behavior of the material in a fire. The purpose of this work was to study the behavior of wood materials under thermal stress of various types. Solving this important task will allow us to develop effective measures to protect wooden materials from fire.

Keywords: wood, wood derivatives, heat exposure, flame exposure, thermodestruction, fire protection.

Пожарная опасность целлюлозы и химических соединений, входящих в состав древесины, накладывает ряд ограничений на применение древесных строительных материалов [1–5]. Выбор строительного материала для изготовления той или иной строительной конструкции основывается на подборе требуемых эксплуатационных характеристик готового изделия. При этом, как правило, пожароопасные характеристики материала не учитываются, а если учитываются, то вносится поправка о необходимости проведения огнезащитной обработки [5–10]. Следует особо отметить, что огнезащитная обработка не должна сводиться к формальной процедуре. Это связано с тем, что при воздействии источника теплового излучения и открытого пламени на обработанную

огнезащитным составом древесину не должны происходить воспламенения и распространения пламени. Практически никогда и никем не учитывается тот факт, что материал остается незащищенным от процесса термодеструкции. При этом степень термического разрушения древесного материала существенно зависит не только от вида и способа огнезащитной обработки, но и от мощности и вида источника зажигания [1–5]. Современные методы оценки показателей пожарной опасности древесины и ее производных практически не уделяют внимания влиянию вида источника зажигания на строительный материал, причем время защитного действия (до начала воспламенения) огнезащитной обработки находится в зависимости от параметров источника зажигания. Таким

образом оценка поведения материалов на основе древесины в зависимости от вида воздействия источников зажигания на испытуемый образец является актуальным научным направлением.

Целью работы являлось исследование поведения обработанных огнезащитными составами образцов древесины и материалов на ее основе при воздействии на них стационарных тепловых потоков и открытого пламени.

Исследование было направлено на выбор оптимальных огнезащитных составов пропиточного и интумесцентного типов, адаптированных к конкретным материалам. При этом оценка проводилась с учетом возможного целевого назначения материала, особенностей практического использования и расположения в пространстве (горизонтального или вертикального) с целью выбора наилучшего результата снижения пожарной опасности строительных конструкций, выполненных из древесины и ее производных.

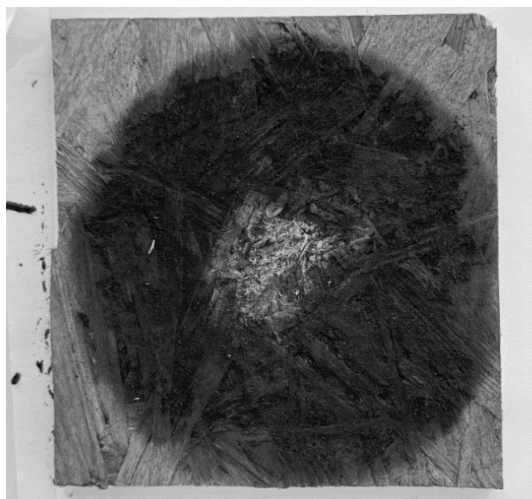
Исследование проводили на образцах древесины сосны (толщина образцов 25 мм) и ориентированно-стружечных плит OSB-3 (МУРОМ, толщина образцов 12 мм), изготовленных из древесины сосны. Указанная толщина была выбрана исходя из области использования данных материалов в строительстве. В качестве огнезащитных составов использовались разные по механизму действия огнезащитные составы известных производителей: пропиточный огнебиозащитный состав на основе неорганических антипиренов (состав 1) и огнезащитный состав на органической основе интумесцентного типа

(состав 2). Обработка образцов древесины огнезащитными составами производилась согласно инструкции изготовителя кистью расходом 450 г/м^2 в один слой. Обработывалась только одна сторона образцов, которая в дальнейшем подвергалась температурному воздействию.

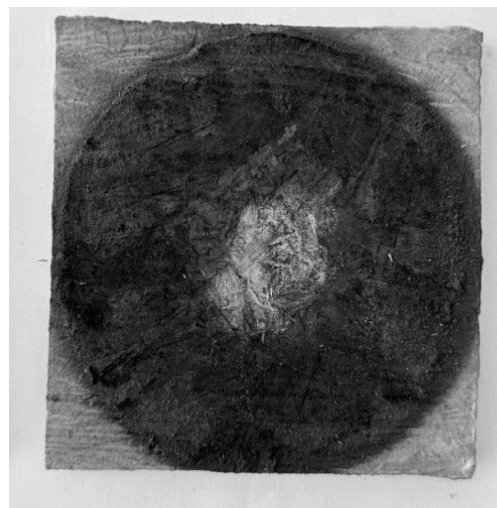
Первая часть исследования заключалась в определении группы воспламеняемости. Эксперимент проводился с целью установления влияния способов огнезащиты древесины на её способность к воспламенению под действием теплового потока.

Согласно методике, приведенной в ГОСТ 30402-96¹, на установке ВСМ. Сущность исследования состоит в экспериментальном определении величины плотности поверхностного теплового потока, при котором происходит воспламенение материала от источника зажигания.

Ранее отмечалось [2, 4], что воспламеняется не сама древесина, а продукты её термического разложения. Таким образом, при воздействии теплового потока будет происходить нагрев образца до высоких температур. При этом происходит выделение горючей паровоздушной среды вследствие термической деструкции образца. При достижении определенной концентрации при внесении источника зажигания происходит воспламенение горючей паровоздушной среды с последующим горением материала. После испытания также оценивали глубину обугливания. Результаты испытаний приведены на рис. 1 и табл. 1.



а)



б)

Рис. 1. Образцы OSB-плит после испытания:

а) OSB-плита, обработанная составом 1 б) OSB-плита, обработанная составом 2

¹ ГОСТ 30402-96 «Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость»

Таблица 1. Результаты определения группы по воспламеняемости образцов

Наименование образца	Тепловой поток, кВт/м ²	Время до воспламенения, с	Группа по воспламеняемости	Глубина обугливания, мм
Необработанная OSB-плита	20±1,2	110±1	B3	2,4±0,1
OSB-плита, обработанная составом 1	20±1,2	130±1	B3	3,0±0,1
OSB-плита, обработанная составом 2	20±1,2	174±1	B3	1,5±0,1
Необработанная древесина сосны	20±1,2	120±1	B3	2,2±0,1
Древесина сосны, обработанная составом 1	20±1,2	193±1	B3	2,7±0,1
Древесина сосны, обработанная составом 2	20±1,2	204±1	B3	1,4±0,1

Как видно из результатов табл. 1, все образцы имеют группу по воспламеняемости B3 (легковоспламеняемые). Обработка огнезащитными составами увеличивает время до воспламенения. Поэтому, можно предположить, что увеличение концентрации защитного состава путем увеличения количества этапов его нанесения позволит существенно увеличить время до воспламенения и получить группу по воспламеняемости B2 (умеренновоспламеняемые). Следует отметить, что в случае древесины сосны время до воспламенения несколько выше, по сравнению с образцами OSB-плиты, что вызвано, по всей видимости, меньшей плотностью древесины сосны и большей глубиной проникновения защитных составов. Последнее обстоятельство обусловлено большей пористостью и меньшей влагостойкостью древесины сосны по сравнению с OSB-плитой. Данное предположение подтверждается соответствующей корреляцией с глубиной обугливания соответствующих образцов.

Вторая часть экспериментальной работы заключалась в исследовании поведения образцов древесных материалов под воздействием пламени газовой горелки (табл. 2). При этом направление воздействия пламени было выбрано с фронтальной стороны материала, что не рассматривается стандартными методами. Исходный вид образцов на рис. 2.

Высота пламени газовой горелки составляла 60±5 мм. По истечении 2 мин, горелка переводилась в горизонтальное положение и подводилась к поверхности образца на расстояние в 20±5 мм. Расстояние от нижнего края образца до края горелки составляло 40±5 мм. Время воздействия пламени пропан-бутановой газовой горелки на исследуемый образец составляло 15 мин. По истечении указанного промежутка времени горелка отводилась в сторону от образца. После его остывания до комнатной температуры определялись изменение массы, площадь и максимальная глубина обугливания.

Таблица 2. Результаты исследования поведения образцов при воздействии пламени горелки под прямым углом

Наименование образца	Максимальная глубина обугливания, мм	Площадь обугливания, см ²	Изменение массы после огневого воздействия, г
Необработанная OSB-плита	7,7±0,1	47,25	5,58±0,02
OSB-плита, обработанная составом 1	6,6±0,1	47,25	7,72±0,02
OSB-плита, обработанная составом 2	3,5±0,1	48,1	3,70±0,02
Необработанная древесина сосны	2,5±0,1	49,95	4,44±0,02
Древесина сосны, обработанная составом 1	3,6±0,1	49,61	6,06±0,02
Древесина сосны, обработанная составом 2	1,2±0,1	51,48	3,24±0,02

При воздействии пламени горелки под прямым углом в течение 15 мин самостоятельного горения не наблюдалось для всех образцов. Однако, при воздействии пламени горелки происходит обугливание образцов, сопровождающееся выделением дыма. При этом площадь обугленного участка в целом соответ-

ствует площади проекции факела пламени на поверхности образцов. Кроме того, максимальная глубина обугливания наблюдается на самом нижнем обугленном участке, и уменьшается к верхнему краю образца (там, где наблюдается кончик пламени) (рис. 3-4).

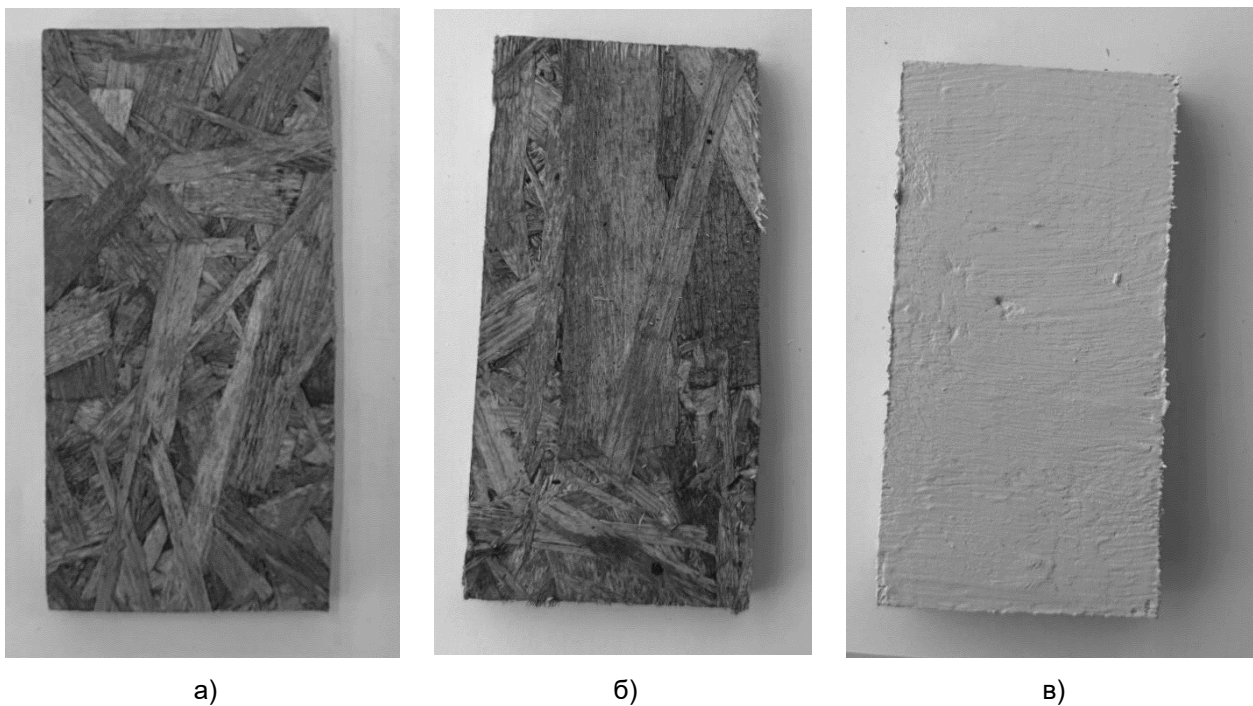


Рис. 2. Внешний вид образцов OSB-плит (размеры образцов 150×75×25 мм) до воздействия пламени горелки под углом 90°:
а) без обработки, б) образец, обработанный составом 1, в) образец, обработанный составом 2

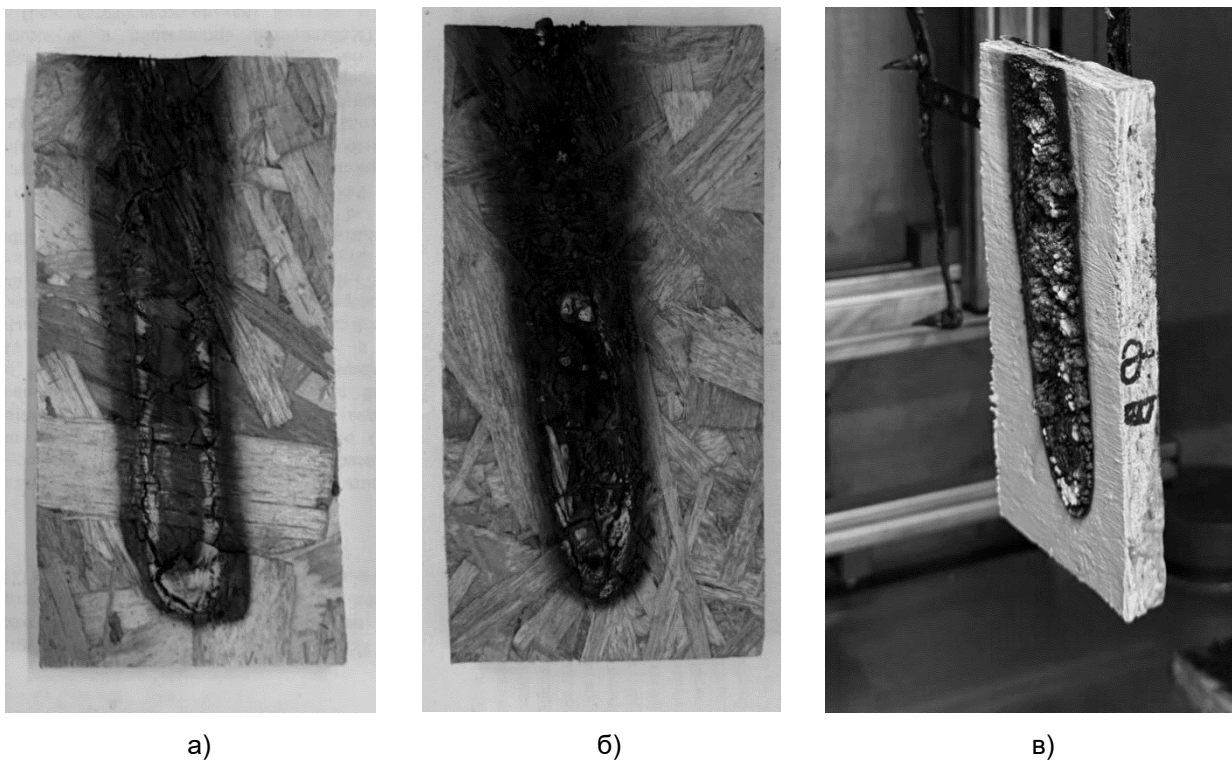
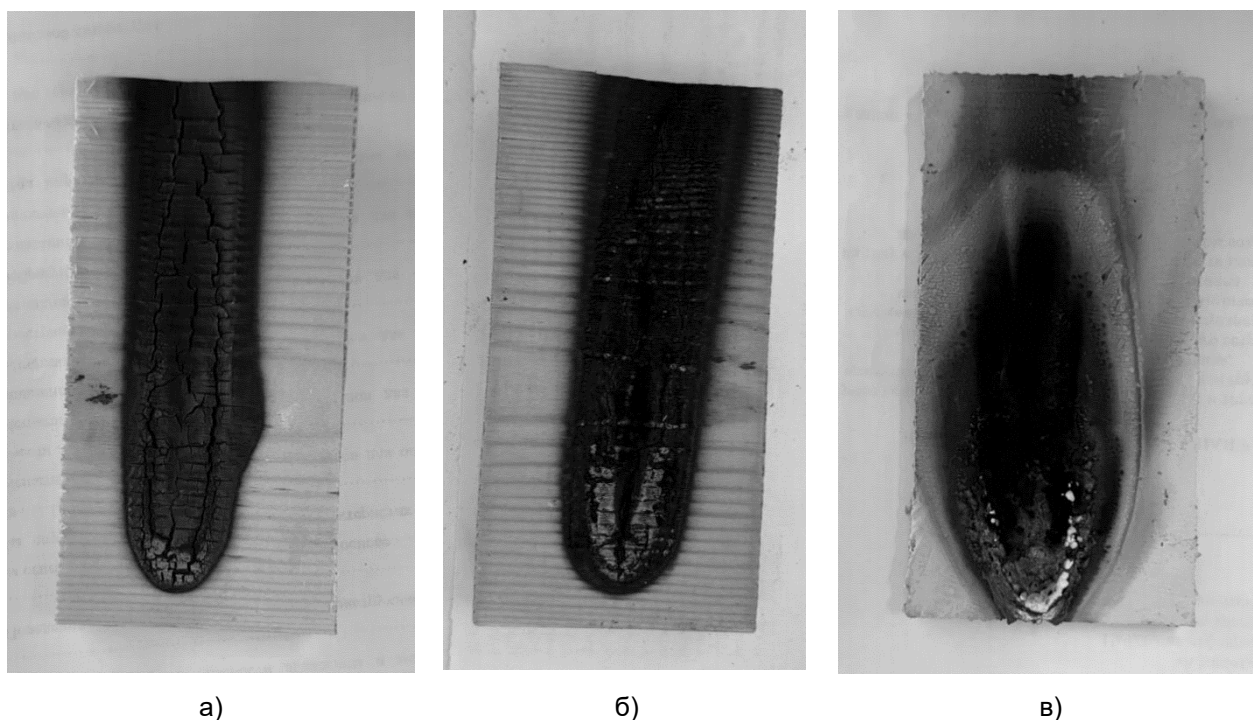


Рис. 3. Внешний вид образцов OSB-плит (размеры образцов 150×75×25 мм) после воздействия пламени горелки под углом 90° к поверхности:
а) без обработки, б) образец, обработанный составом 1, в) образец, обработанный составом 2



а)

б)

в)

Рис. 4. Образцы древесины сосны (размеры образцов 150×75×25 мм) после воздействия пламени горелки под углом 90°:

а) без обработки, б) образец, обработанный составом 1, в) образец, обработанный составом 2

Если сравнить глубину обугливания, то в случае OSB-плит она будет больше для соответствующих образцов. По всей видимости, это вызвано большей плотностью OSB-плит, по сравнению с древесиной, а также более высоким содержанием смол, входящих в состав OSB-плиты. Обработка материалов пропиточным огнезащитным составом увеличивает глубину обугливания, поскольку, по всей видимости, увеличивает теплопроводность материала за счет неорганических веществ (в первую очередь солей), входящих в огнезащитную композицию. Наименьшая глубина обугливания наблюдается при использовании защитного состава интумесцентного типа, что обусловлено образованием теплоизолирующего слоя на поверхности образца при воздействии огня. Как следствие, данные образцы имеют и наименьшее изменение абсолютной массы образцов после огневого воздействия. Большой размер площади обугливания для образцов с интумесцентным составом вызван тем обстоятельством, что сам защитный слой при достижении определенной температуры начинает обугливаться (рис. 3-4).

Подводя итог результатам исследования, можно сделать вывод, что OSB-3 плита оказалась менее стойкой к воздействию теплового потока и пламени газовой горелки, что выразилось в меньшем времени с начала воздействия стационарным тепловым потоком до

момента воспламенения, большей глубине обугливания и большей потере массы после огневого воздействия по сравнению с натуральной древесиной сосны. В случае образцов, обработанных огнезащитными составами, в случае обеих серий экспериментов наилучшие результаты наблюдались для образцов, обработанных огнезащитным составом на органической основе интумесцентного типа.

По результатам определения группы воспламеняемости образцов установлено, что OSB-3 плита и древесина сосны относятся к группе легковоспламеняемых материалов (группа В3). Однослойная обработка этих материалов огнезащитными составами с расходом 450 г/м² увеличивает время до воспламенения при тепловом потоке 20 кВт/м², но не изменяет группу по воспламеняемости. При воздействии малого пламени газовой горелки под углом 90° к поверхности воспламенение и самостоятельное горение образцов не происходит. Максимальная глубина обугливания наблюдается в нижней части зоны обугливания, в то время как в верхней части она значительно меньше.

Для увеличения стойкости к воспламенению под воздействием теплового потока необходима многослойная обработка огнезащитными составами, а также разработка огнезащитных композиций, уменьшающих выход горючих газообразных продуктов термической деградации древесных материалов или изоли-

рующих экспонируемую поверхность от кислорода воздуха.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке более эффективных огнезащитных составов для древесных

материалов и новых методов оценки пожарной опасности горючих строительных материалов в зависимости от вида и направления воздействия источника зажигания на испытуемый образец.

Список литературы

1. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Выделение дыма при термическом разложении и горении древесины // Лесной вестник. 2004. № 2 (33). С. 99–103.
2. Характеристики тепловыделения при горении древесины различных пород и видов / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность, 2011, т. 20, № 7. С. 2–7.
3. Физико-механические и пожароопасные свойства древесины с глубокой пропиткой огнебиозащитными составами / Д. М. Нигматуллина, А. Б. Сивенков, Е. Ю. Полищук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 6. С. 43–51.
4. Защита целлюлозных материалов от воздействия высоких температур и открытого пламени / С. Н. Ульева, А. Л. Никифоров, В. Е. Румянцева [и др.] // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. Вып. № 2 (410). С. 207–212.
5. Корольченко О. Н., Цариченко С. Г., Константинова Н. И. К вопросу о свойствах пожарной опасности огнезащитной древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2021. № 2. С. 23–34.
6. Эффективность и механизм действия двух огнезащитных систем для древесины / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. Том 16. № 5. С. 23–30.
7. Тычино Н. А. Огнезащита материалов, изделий и конструкций из древесины: испытания и экономика // Проблемы Науки. 2016. № 20 (62). С. 14–22.
8. Трушкин Д. В., Корольченко О. Н., Бельцова Т. Г. Горючесть древесины, обработанной огнезащитными составами // Пожаровзрывобезопасность. 2008, том 17, №1, С. 29–33.
9. Зависимость эффективности обработки древесины от плотности разных пород древесины огнезащитными составами / И. А. Скрипко, А. Л. Никифоров, С. Н. Наконечный [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. №1 (54). С. 154–158.
10. Определение показателей воспламенения древесины сосны, обработанной огнебиозащитным составом / С. Н. Наконечный, Н. М. Панев, А. Л. Никифоров [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2021. № 2 (39). С. 80–87.

References

1. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. Vydelenie dyma pri termicheskom razlozhenii i gorenii drevesiny [Smoke emission during thermal decomposition and combustion of wood]. *Lesnoj vestnik*, 2004, vol. 2 (33). pp. 99–103.
2. Kharakteristiki teplovydeleniya pri gorenii drevesiny razlichnykh porod i vidov [Characteristics of heat generation during combustion of different types of wood] / R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2011, vol. 20, issue 7, pp. 2–7.
3. Fiziko-mekhanicheskie i požaropasnyye svojstva drevesiny s glubokoj propitkoj ognеbiозashchitnymi sostavami [Physical, mechanical, and fire-hazardous properties of wood with deep impregnation with fire-retardant and bio-protective compounds] / D. M. Nigmatullina, A. B. Sivenkov, E. Yu. Polishchuk [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2017, issue 6, pp. 43–51.
4. Zashchita tsellyuloznykh materialov ot vozdejstviya vysokikh temperatur i otkrytogo plameni [Protection of cellulose materials from high temperatures and open flames] / S. N. Uleva, A. L. Nikiforov, V. E. Rummyantseva [et al.]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2024, vol. 2 (410), pp. 207–212.
5. Korolchenko O. N., Tsarichenko S. G., Konstantinova N. I. K voprosu o svojstvakh požarnoj opasnosti ognеzashchishchennoj drevesiny [On the fire hazard properties of fire-resistant wood]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2021, vol. 2, pp. 23–34.
6. Effektivnost' i mekhanizm dejstviya dvukh ognеzashchitnykh sistem dlya drevesiny [The effectiveness and mechanism of action of two fire-resistant systems for wood]. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov [et al.]. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2007, vol. 16, issue.5, pp. 23–30.
7. Tychino N. A. Ognеzashchita materialov, izdelij i konstruksij iz drevesiny: ispytaniya i ekonomika [Fire protection of materials, products, and structures made of wood: testing and economics]. *Problemy Nauki*, 2016, vol. 20 (62), pp. 14–22.
8. Trushkin D. V., Korol'chenko O. N. Bel'tsova T. G. Goryuchest' drevesiny, obrabotanoj ognеzashchitnymi sostavami [Combustibility of wood treated with fire-retardant compounds]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2008, vol. 17, issue 1, pp. 29–33.

9. Zavisimost' effektivnosti obrabotok drevesiny ot plotnosti raznykh porod drevesiny ognезashchitnymi sostavami [Dependence of the effectiveness of wood treatments on the density of different types of wood treated with fire retardants] / I. A. Skripko, A. L. Nikiforov, S. N. Nakonechnyj [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2025, vol.1 (54), pp. 154–158.

10. Opređenje pokazatelej vosplameniya drevesiny sosny, obrabotannoj ognеbi-ozashchitnym sostavom [Determination of the ignition characteristics of pine wood treated with a fire-retardant composition] / S. N. Nakonechnyj, N. M. Panev, A. L. Nikiforov *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2021, vol. 2 (39), pp. 80–87.

Кочетова Анна Анатольевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
адъюнкт заочной формы обучения
E-mail: kochetova-a-a@mail.ru

Kochetova Anna Anatolyevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
postgraduate student
E-mail: kochetova-a-a@mail.ru

Ульева Светлана Николаевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат химических наук, доцент
E-mail: jivotjagina@mail.ru

Uljeva Svetlana Nikolaevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of chemical sciences, associate professor
E-mail: jivotjagina@mail.ru

Шабунин Сергей Александрович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат химических наук
E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Shabunin Sergey Alexandrovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of chemical sciences
E-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Никифоров Александр Леонидович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
доктор технических наук, старший научный сотрудник
E-mail: anikiforoff@list.ru

Nikiforov Alexander Leonidovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Doctor of Technical Sciences, senior researcher
E-mail: anikiforoff@list.ru

УДК 614.835.3

DOI 10.48612/ntp/3kp9-h92n-hgn7

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

М. О. МЕХОНОШИНА¹, Ю. Е. АКТЕРСКИЙ¹, А. А. ТАРАНЦЕВ²

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

² Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

E-mail: mehonoshina.08@mail.ru, akterskij.y@igps.ru, t__54@mail.ru

В статье представлена динамическая модель оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности производственных объектов хранения сжиженного водородного топлива, основанная на теории непрерывных цепей Маркова. Модель описывает объект как систему, изменяющуюся во времени через группу определенных состояний (низкий уровень пожарной опасности, средний уровень пожарной опасности, высокий уровень пожарной опасности, критический уровень пожарной опасности, пожар, тушение пожара, ремонтно-восстановительные работы). Важным элементом являются интенсивности переходов между этими состояниями, рассчитываемые на статистике отказов оборудования, экспериментальных данных значений НКПР, вероятности обнаружения утечек, температурного режима хранения сжиженного водорода. Модель позволяет количественно прогнозировать вероятность нахождения объекта в аварийном состоянии в любой момент времени, что является основой для разработки противоаварийных мер и оптимизации систем безопасности.

Ключевые слова: сжиженное водородное топливо, пожарная опасность, динамическая модель, оценка риска, прогнозирование, производственные объекты, безопасность

MODEL FOR ASSESSING AND FORECASTING THE FIRE HAZARD LEVEL OF LNG STORAGE FACILITIES

M. O. MEKHONOSHINA¹, Yu. E. AKTERSKIY¹, A. A. TARANTSEV²

¹ St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, St. Petersburg

² N. S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, St. Petersburg

E-mail: goryacheva.97@inbox.ru, akterskij.y@igps.ru, t__54@mail.ru

The article presents a dynamic model for assessing and predicting the fire hazard level of production facilities for storing liquefied hydrogen fuel, based on the theory of continuous Markov chains. The model describes the facility as a system that changes over time through a group of specific states (low fire hazard level, medium fire hazard level, high fire hazard level, critical fire hazard level, fire, fire suppression, and repair and restoration work). An important element is the transition rates between these states, which are calculated based on equipment failure statistics, experimental data on the lower flammable limit, the probability of detecting leaks, and the temperature conditions for storing liquefied hydrogen. The model allows for the quantitative prediction of the probability of an object being in an emergency state at any given time, which is the basis for risk assessment.

Key words: liquefied hydrogen fuel, fire hazard, dynamic model, risk assessment, forecasting, production facilities, and safety

Введение

В современном мире растет тенденция к декарбонизации, в связи с чем ископаемые энергетические ресурсы отходят на второй план, так как являются источниками наибольших выбросов углекислого и других парниковых газов в атмосферу. В этом контексте водород приобретает стратегическое значение как ключевой элемент чистой энергетики в будущем. Ведущими странами разработаны нормативные документы, отражающие переход от традиционных источников энергии к использованию водорода в качестве энергоносителя. Россия не отстает от этой тенденции и в 2020 году утвердила концепцию развития водородной энергетики в Российской Федерации, которая определяет цели по производству, внутреннему потреблению и экспорту водорода [1–3].

В настоящее время происходит активное внедрение и развитие водородной энергетики, а также расширение областей применения водородного топлива. Все эти процессы сопровождаются созданием сложной инфраструктуры, ключевым элементом которой является создание объектов для хранения водорода. Пожарная опасность водорода характеризуется его физическими свойствами такими как, широкие пределы распространения пламени (составляет от 4 % до 75 % взрывоопасной смеси с воздухом), низкая энергия воспламенения (составляет 0,02 мДж), высокая скорость распространения пламени (скорость горения в воздухе составляет 2,65 м/с), низкая температура самовоспламенения водорода в воздухе (составляет 500 °С), высокая теплопроводная

способность (при сгорании 1 кг водорода выделяется около 141 МДж/кг). Высокая проникающая способность, низкая плотность и высокая подвижность молекул, отсутствие видимого пламени при горении и хрупкость материалов при контакте с водородом создают высокий уровень пожарной опасности при его хранении. Последствия утечек водорода могут иметь катастрофический характер как для работников предприятий, так и для проживающих в селитебной зоне.

Так как водород – это легкий газ, способный образовывать взрывоопасные смеси с воздухом, он так же обладает очень высокой воспламеняемостью и способен воспламеняться при наличии малого источника тепла. При воспламенении водорода отсутствует видимое пламя и образуется высокая температура горения, а также увеличивается скорость протекания реакции, что вызывает сложности при тушении.

В данной работе будем рассматривать обеспечение пожарной безопасности хранения водорода в сжиженном состоянии.

Сжиженный водород на объектах хранится в специальных резервуарах, называемых криогенными контейнерами (рис. 1) [4]. В них сжиженный водород хранится в диапазоне температур от -252,77 °С до -259,19 °С. Такие резервуары никогда не заполняют полностью водородом, оставляя не менее 5 % свободного пространства. Это нужно для того, чтобы в дальнейшем не нарастало давление, которое способно привести к разгерметизации этого резервуара и дальнейшему истечению водорода.

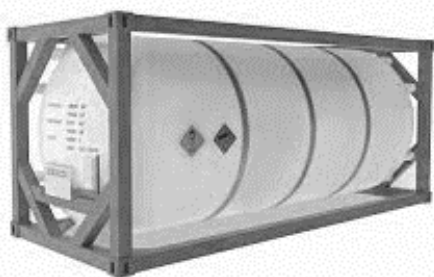


Рис. 1. Криогенные емкости для хранения сжиженного водорода

Для объектов хранения сжиженного водородного топлива предусмотрены следующие системы защиты:

- Предохранительные клапаны (обеспечивают сброс давления при его повышении);
- Система, обеспечивающая постоянный контроль хранения сжиженного водорода

(расходомеры, датчики давления, манометры, термометры, газоанализаторы);

- Системы установок пожаротушения;
- Системы вентиляции.

Время срабатывания систем защиты зависит от типа и конструкции, а также определяется паспортом на конкретное оборудование.

Существующие подходы к обеспечению пожарной безопасности объектов хранения сжиженного водородного топлива основываются на оценке пожарного риска, регламентированного для пожароопасных объектов, которые носят статичный и детерминированный характер, но не в полной мере учитывают динамическую природу развития аварии на объектах хранения сжиженного водородного топлива.

Так же написано множество работ [5–9] по хранению, транспортировке, нормативному регулированию, выявлению пожарной опасности водорода, но работ по снижению этой опасности нет.

Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами такими как:

- Растущий масштаб применения водорода;
- Особая пожарная опасность водорода;
- Недостаточно разработанные методы снижения пожарной опасности хранения сжиженного водорода.

Целью работы является разработка динамической модели оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности производственных объектов хранения сжиженного водородного топлива, основанной на применении Марковского процесса.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели, поставленной в работе, применяется метод моделирования на основе непрерывных Марковских цепей, а также математическое моделирование с помощью метода Монте-Карло. Данный подход позволяет отразить вероятностный и динамический характер развития аварийных ситуаций на объектах хранения сжиженного водорода.

Процесс хранения сжиженного водородного топлива с возможным развитием событий представим в виде размеченного графа переходов системы из одного состояния в другое (рис. 2).

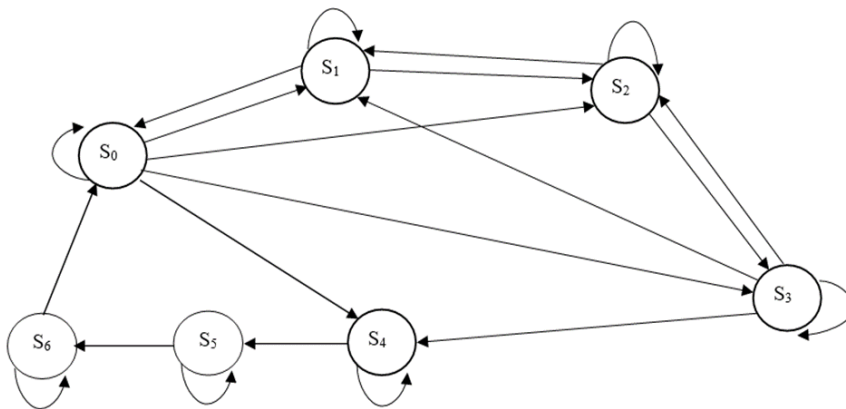


Рис. 2. Граф переходов системы из состояния в состояние

Поясним что, отсутствие прямого перехода $S_2 \rightarrow S_4$ обусловлено наличием систем раннего обнаружения и предотвращения пожаров, а также постепенным накоплением факторов риска возникновения пожароопасной ситуации.

Также при достижении одного из критически важных параметров при хранении сжиженного водородного топлива вероятность перехода в состояние пожара резко возрастает. Дадим пояснение по каждому состоянию в табл. 1.

В качестве параметра, который количественно описывает скорость перехода из одного состояния в другое, выберем $\{\lambda\}$ – интенсивность переходов. Интенсивности переходов рассчитываются на основе статистики отказов оборудования, экспериментальных данных скорости образования горючей смеси, технических характеристик систем защиты оборудования, вероятности обнаружения утечек, температурного режима хранения, давления в резервуарах.

Представим описание каждого перехода системы в табл. 2.

Таблица 1. Описание состояний переходов системы

Состояние	Наименование состояния	Описание состояния
S ₀	Низкий уровень ПО	Нормальные показатели температуры хранения водорода в сжиженном состоянии (от -252,77 °С до -259,19 °С); Концентрация водорода в воздухе ниже уровня НКПР; Отсутствие утечек водорода; Исправная работа систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S ₁ .
S ₁	Средний уровень ПО	Температурные отклонения составляют до 2 °С; Концентрация водорода составляет 80–90 % от НКПР; Незначительные утечки водорода; Частичные сбои в работе систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S ₂
S ₂	Высокий уровень ПО	Температурные отклонения составляют 24°С; Концентрация водорода составляет 95-100 % от НКПР; Значительные утечки водорода; Сбои в работе систем контроля; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S ₃ .
S ₃	Критический уровень ПО	Температурные отклонения выше допустимой нормы; Концентрация водорода составляет выше НКПР; Критические утечки; Отказы в работе систем защиты; Достижение любого критического показателя приводит систему в состояние S ₄ .
S ₄	Пожар	Стадия активного горения
S ₅	Тушение пожара	Процесс ликвидации горения
S ₆	Ремонтно-восстановительные работы	Восстановительные работы

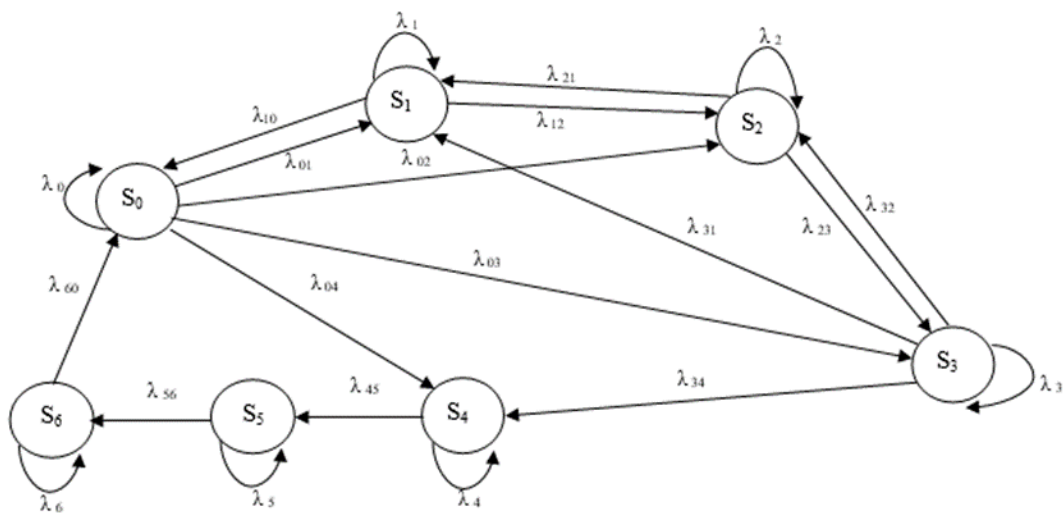


Рис. 3. Интенсивности переходов

Таблица 2. Описание переходов системы

λ перехода	Описание перехода
λ ₀	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Низкий уровень ПО»
λ ₀₁	Система перешла в состояние «Средний уровень ПО»
λ ₁₀	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Низкий уровень ПО»
λ ₀₂	Система перешла в состояние «Высокий уровень ПО»
λ ₀₃	Система перешла в состояние «Критический уровень ПО»
λ ₀₄	Система перешла в состояние «Пожар»
λ ₁	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Средний уровень ПО»
λ ₁₂	Система перешла в состояние «Высокий уровень ПО»
λ ₂₁	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Средний уровень ПО»
λ ₂	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Высокий уровень ПО»
λ ₂₃	Система перешла в состояние «Критический уровень ПО»
λ ₃₂	Система вернулась в предыдущее в состоянии «Высокий уровень ПО»
λ ₃	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Критический уровень ПО»
λ ₃₁	Система вернулась в состояние «Средний уровень ПО»
λ ₃₄	Система перешла в состояние «Пожар»
λ ₄	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Пожар»
λ ₄₅	Система перешла в состояние «Тушение пожара»
λ ₅	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Тушение пожара»
λ ₅₆	Система перешла в состояние «Ремонтно-восстановительные работы»
λ ₆	Состояние системы не изменилось. Система находится в состоянии «Ремонтно-восстановительные работы»
λ ₆₀	Система перешла в состояние «Низкий уровень ПО»

Исходя из представленного графа запишем систему алгебраических уравнений.

Для установившегося режима работы, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04})p_0 + \lambda_{10}p_1 + \lambda_{60}p_6; \\ 0 = \lambda_{01}p_0 - (\lambda_{10} + \lambda_{12})p_1 + \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3; \\ 0 = \lambda_{02}p_0 + \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})p_2 + \lambda_{32}p_3; \\ 0 = \lambda_{03}p_0 + \lambda_{23}p_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})p_3; \\ 0 = \lambda_{04}p_0 + \lambda_{34}p_3 - \lambda_{45}p_4; \\ 0 = \lambda_{45}p_4 - \lambda_{56}p_5; \\ 0 = \lambda_{56}p_5 - \lambda_{60}p_6; \end{cases} \quad (1)$$

где {λ} – интенсивности переходов; {p} – вероятности состояний (причём $\sum_{i=0}^6 p_i = 1$).

Решение системы уравнений (1) может быть получено в аналитическом виде:

$$\begin{cases} p_0 = (1 + \sum_{i=1}^6 K_i)^{-1}; \\ p_i = K_i p_0, \quad i = 1, \dots, 6, \end{cases} \quad (2)$$

где {K} – коэффициенты, зависящие от интенсивностей переходов {λ}.

Применительно к системе уравнений (1) после алгебраических преобразований получаем коэффициенты {K}:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) - \lambda_{03}\lambda_{34} - \lambda_{02}\lambda_{31} - \lambda_{01}\lambda_{32}}{\lambda_{23}\lambda_{34}} \cdot \frac{\lambda_{21}\lambda_{32} + \lambda_{31}(\lambda_{21} + \lambda_{23})}{\lambda_{10}(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) + \lambda_{12}\lambda_{31} + \lambda_{32}(\lambda_{10} + \lambda_{12})}; \\ K_2 = \frac{\lambda_{31}(\lambda_{02} + K_1\lambda_{12}) + \lambda_{32}[K_1(\lambda_{10} + \lambda_{12}) - \lambda_{01}]}{\lambda_{21}\lambda_{32} + \lambda_{31}(\lambda_{21} + \lambda_{23})}; \\ K_3 = \frac{\lambda_{03} + K_2\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}}; \\ K_4 = \frac{\lambda_{04} + K_3\lambda_{34}}{\lambda_{45}}; \\ K_5 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{56}} K_4; \\ K_6 = \frac{\lambda_{56}}{\lambda_{60}} K_5. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, с использованием выражений (2) и (3) становится возможным найти вероятности {p} состояний исследуемой системы и принять решение либо об успешности её функционирования, либо о необходимости уточнения интенсивностей переходов {λ} для обеспечения нахождения ключевых вероятностей состояний в допустимых диапазонах.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Для подтверждения результативности изложенного выше метода рассмотрим тестовые примеры.

Пример 1. Пусть интенсивности переходов следующие: $\lambda_{01}=0,10$; $\lambda_{02}=0,15$; $\lambda_{03}=0,20$; $\lambda_{04}=0,25$; $\lambda_{10}=0,30$; $\lambda_{12}=0,35$; $\lambda_{21}=0,40$; $\lambda_{23}=0,45$; $\lambda_{31}=0,50$; $\lambda_{32}=0,55$; $\lambda_{34}=0,60$; $\lambda_{45}=0,65$; $\lambda_{56}=0,70$; $\lambda_{60}=0,75$.

Сначала найдём численное решение системы уравнений (1), которая с учётом вышеприведённых интенсивностей переходов $\{\lambda\}$ примет вид:

$$\begin{cases} 0 = -0,70p_0 + 0,3p_1 + 0,75p_6; \\ 0 = 0,1p_0 - 0,65p_1 + 0,40p_2 + 0,50p_3; \\ 0 = 0,15p_0 + 0,35p_1 - 0,85p_2 + 0,55p_3; \\ 0 = 0,20p_0 + 0,45p_2 - 1,65p_3; \\ 0 = 0,25p_0 + 0,60p_3 - 0,65p_4; \\ 0 = 0,65p_4 - 0,70p_5; \\ 0 = 0,70p_5 - 0,75p_6. \end{cases}$$

Численное решение системы уравнений стандартными компьютерными методами позволяет получить вероятности состояний: $p_0 \approx 0,20740$; $p_1 \approx 0,17742$; $p_2 \approx 0,15290$; $p_3 \approx 0,06684$; $p_4 \approx 0,14147$; $p_5 \approx 0,13136$; $p_6 \approx 0,12261$. Нетрудно убедиться, что $\sum_{i=0}^6 p_i \approx 1$.

Теперь получим эти вероятности состояний по выражениям (2) с учётом (3). Найдём коэффициенты $\{K\}$:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{0,45 \cdot 1,65 - 0,2 \cdot 0,6}{0,45 \cdot 0,6} \cdot \frac{0,15 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,55}{0,4 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,85} \approx 0,85544; \\ K_2 = \frac{0,5(0,15 + 0,85544 \cdot 0,35) + 0,55[0,85544 \cdot 0,65 - 0,1]}{0,4 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,85} \approx 0,73724; \\ K_3 = \frac{0,2 + 0,73724 \cdot 0,45}{1,65} \approx 0,32228; \\ K_4 = \frac{0,25 + 0,32228 \cdot 0,6}{0,65} \approx 0,68211; \\ K_5 = \frac{0,65}{0,70} \cdot 0,68211 \approx 0,63338; \\ K_6 = \frac{0,70}{0,75} \cdot 0,63338 \approx 0,59116. \end{cases}$$

Из выражения (2) находим вероятности состояний:

$$\begin{cases} p_0 = \frac{1}{1 + 0,85544 + 0,73724 + 0,32228 + 0,68211 + 0,63338 + 0,59116} \approx 0,20740; \\ p_1 = 0,85544 \cdot 0,20740 \approx 0,17742; \\ p_2 = 0,73724 \cdot 0,20740 \approx 0,15291; \\ p_3 = 0,32228 \cdot 0,20740 \approx 0,06684; \\ p_4 = 0,68211 \cdot 0,20740 \approx 0,14147; \\ p_5 = 0,63338 \cdot 0,20740 \approx 0,13136; \\ p_6 = 0,59116 \cdot 0,20740 \approx 0,12261. \end{cases}$$

Полученные аналитическим способом значения вероятностей состояний совпадают с вероятностями, полученными численным моделированием, что свидетельствует об объективности результатов.

Пример 2. Пусть интенсивности переходов следующие: $\lambda_{01}=\lambda_{02}=\lambda_{03}=\lambda_{04}=0,2$; $\lambda_{10}=\lambda_{12}=\lambda_{21}=0,4$; $\lambda_{23}=\lambda_{31}=0,5$; $\lambda_{32}=\lambda_{34}=0,2$; $\lambda_{45}=\lambda_{56}=\lambda_{60}=0,8$

Численное решение системы уравнений (1), которая с учётом вышеприведённых интенсивностей переходов $\{\lambda\}$ примет вид:

$$\begin{cases} 0 = -0,8p_0 + 0,4p_1 + 0,8p_6; \\ 0 = 0,2p_0 - 0,8p_1 + 0,4p_2 + 0,5p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,4p_1 - 0,9p_2 + 0,2p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,5p_2 - 0,9p_3; \\ 0 = 0,2p_0 + 0,2p_3 - 0,8p_4; \\ 0 = 0,8p_4 - 0,8p_5; \\ 0 = 0,8p_5 - 0,8p_6. \end{cases}$$

Численное решение системы уравнений стандартными компьютерными методами позволяет получить вероятности состояний: $p_0 \approx 0,19865$; $p_1 \approx 0,22685$; $p_2 \approx 0,17658$; $p_3 \approx 0,14224$; $p_4=p_5=p_6 \approx 0,08522$. Нетрудно убедиться, что $\sum_{i=0}^6 p_i \approx 1$.

Получим эти вероятности состояний по выражениям (2) с учётом (3). Найдём коэффициенты $\{K\}$:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{0,6 \cdot 0,9 - 0,2 \cdot 0,2}{0,5 \cdot 0,2} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,5 - 0,2 \cdot 0,2}{0,4 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,9} \approx 1,14197; \\ K_2 = \frac{0,5(0,2 + 1,14197 \cdot 0,4) + 0,2[1,14197 \cdot 0,8 - 0,2]}{0,4 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,9} \approx 0,88889; \\ K_3 = \frac{0,2 + 0,88889 \cdot 0,5}{0,9} \approx 0,71605; \\ K_4 = \frac{0,2 + 0,71605 \cdot 0,2}{0,8} \approx 0,42901; \\ K_5 = \frac{0,8}{0,8} \cdot 0,42901 \approx 0,42901; \\ K_6 = \frac{0,8}{0,8} \cdot 0,42901 \approx 0,42901. \end{cases}$$

Из выражения (2) находим вероятности состояний:

$$\begin{cases} p_0 = \frac{1}{1 + 1,14197 + 0,88889 + 0,71605 + 3 \cdot 0,42901} \approx 0,19865; \\ p_1 = 1,14197 \cdot 0,19865 \approx 0,22685; \\ p_2 = 0,88889 \cdot 0,19865 \approx 0,17658; \\ p_3 = 0,71605 \cdot 0,19865 \approx 0,14224; \\ p_4 = p_5 = p_6 = 0,42901 \cdot 0,19865 \approx 0,08522. \end{cases}$$

Полученные аналитическим способом значения вероятностей состояний, как и в предыдущем примере, совпадают с вероятностями, полученными численным моделированием, что свидетельствует об объективности результатов. Разработанная модель позволяет

количественно оценивать вероятность аварийных ситуаций, прогнозировать динамику изменения уровня пожарной опасности.

Заключение

В работе была представлена математическая модель для оценки и прогнозирования уровня пожарной опасности объектов хранения сжиженного водородного топлива. В качестве математического аппарата были выбраны цепи Маркова. В качестве расчетной величины были выбраны интенсивности переходов между состояниями системы. Такой подход позволил перейти от качественного описания пожарной опасности к ее количественной оценке.

Модель позволяет рассчитывать вероятности нахождения системы в том или ином состоянии в любой момент времени. Это дает возможность не только понимать текущий уровень опасности, но и строить прогнозы его развития.

Уникальность модели заключается в том, что она учитывает специфические

характеристики водорода, которые существенно отличаются от свойств других горючих веществ. Таким образом, представленная модель является специализированным инструментом, учитывающим уникальные характеристики водородного топлива и особенности его хранения, что делает ее неприменимой для других видов топлива без существенной модификации параметров и условий моделирования.

Практическая значимость разработанной модели заключается в создании основ для совершенствования системы безопасности хранения сжиженного водорода. Однако для полной реализации потенциала модели необходимо формирование базы данных по отказам оборудования и инцидентам на конкретном объекте хранения сжиженного водорода, которая будет включать в себя статистику отказов криогенного оборудования, данные о частоте утечек водорода, а также другим параметрам модели.

Список литературы

1. Горячева М. О., Актерский Ю. Е., Минкин Д. Ю. Проблемы обеспечения пожарной безопасности на объектах водородной энергетики и нефтегазового комплекса // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023. № 1 (46). С. 78–83. EDN: UBACXR.

2. Зайченко В. М., Шпильрайн Э. Э., Штеренберг В. Я. Водородная энергетика: современное состояние и направления дальнейшего развития // *Теплоэнергетика*. 2003. № 5. С. 61–67. EDN: PVOFNL.

3. Байчиева Ш., Джумаев У., Ашыров А. Перспективы и недостатки водородной энергетики // *In Situ*. 2023. № 1. С. 105–108. EDN: MOWVMY.

4. Системы хранения водорода / О. К. Алексеева, С. И. Козлов, Р. О. Самсонов [и др.] // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2009. № 5 (11). С. 72–79. EDN: KXVHNZ.

5. Домашенко А. М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2006. № 11 (43). С. 28–38. EDN: HYRTYX.

6. Шебеко Ю. Н., Болодьян И. А. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2022. № 2 (51). С. 151–159. EDN: VGVFRF.

7. Шебеко Ю. Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4 (101). С. 36–42. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.101.4.003. EDN: UNLYCV.

8. Горев В. А., Медведев Г. М. Кинетические и газодинамические причины аварийных взрывов водорода // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22, № 11. С. 24–30. EDN: RJZZQH.

9. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42, № 1. С. 26–33. EDN: NXZUFX.

10. Васильков Ю. В., Василькова Н. Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании // *Финансы и статистика*. 1999.

References

1. Goryacheva M. O., Akterskij Yu. E., Minkin D. Yu. Problemy` obespecheniya pozharnoj bezopasnosti na ob`ektax vodorodnoj e`nergetiki i neftegazovogo kompleksa [Problems of fire safety at hydrogen energy and oil and gas complex facilities]. *Sovremennyy`e problemy` grazhdanskoy zashity`*, 2023, vol. 1 (46), pp. 78–83

2. Zajchenko V. M., Shpil`rajn E`. E`. Shterenberg V. Ya. Vodorodnaya e`nergetika: sovremennoe sostoyanie i napravleniya dal`nejshego razvitiya [Hydrogen Energy: Current State and Future Directions]. *Teploe`nergetika*, 2003, vol. 5, pp. 61–67

3. Bajchy`eva Sh., Dzhumaev U., Ashy`rov A. Perspektivy` i nedostatki vodorodnoj e`nergetiki [Prospects and disadvantages of hydrogen energy]. *In Situ*, 2023, issue 1, pp. 105–108

4. Sistemy` xraneniya vodoroda [Hydrogen storage systems] / O. K. Alekseeva, S. I. Kozlov, R. O. Samsonov [et al.]. *Transport na al`ternativnom toplive*, 2009, vol. 5 (11), pp. 72–79

5. Domashenko A. M. Problemy` vzry`vo-bezопасnosti pri sozdanii i e`kspluatatsii promy`shlenny`x sistem xraneniya i transportirovaniya zhidkogo vodoroda. Standarty` [Explosion safety issues in the design and operation of industrial systems for storing and transporting liquid hydrogen. Standards]. *Mezhdunarodny`j nauchny`j zhurnal «Al`ternativnaya e`nergetika i e`kologiya»*, 2006, issue 11(43), pp. 28-38

6. Shebeko, Yu. N., Bolod`yan I. A. Mezhdunarodny`j opy`t obespecheniya pozharnoj bezопасnosti vodorodny`x avtozapravochny`x stancij [International experience in ensuring fire safety at hydrogen gas stations]. *Nauchno-*

texnicheskij sbornik «Vesti gazovoj nauki», 2022, vol. 2 (51), pp. 151–159

7. Shebeko Yu. N. Normativny`e dokumenty`, reglamentiruyushhie voprosy` pozharnoj bezопасnosti ob`ektov infrastruktury` vodorodnoj e`nergetiki [Regulatory documents governing fire safety at hydrogen energy infrastructure facilities]. *Pozharnaya bezопасnost`*, 2020, vol. 4 (101), pp. 36–42.

8. Gorev V. A., Medvedev G. M. Kineticheskie i gazodinamicheskie prichiny` avariyny`x vzry`vov vodoroda [Kinetic and gas-dynamic causes of hydrogen explosions]. *Pozharovzry`vobezопасnost`*, 2013, vol. 22, issue 11, pp. 24–30

9. Bedarev I. A., Fedorov A. V. Sravnitel`ny`j analiz trex matematicheskix modelej vosplamneniya vodoroda [Comparative analysis of three mathematical models of hydrogen ignition]. *Fizika goreniya i vzry`va*, 2006, vol 42, issue 1, pp. 26–33

10. Vasil`kov Yu. V., Vasil`kova N. N. Komp`yuterny`e tekhnologii vy`chislenij v matematicheskom modelirovanii [Computer technologies for mathematical modeling]. *Finansy` i statistika*, 1999.

Мехоношина Мария Олеговна

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
Преподаватель кафедры пожарной безопасности зданий
и автоматизированных систем пожаротушения
E-mail: mehonoshina.08@mail.ru
Mekhonoshina Maria Olegovna
St. Petersburg State Fire Service EMERCOM of Russia
Russian Federation, St. Petersburg
Lecturer department of building fire safety and automated fire fighting systems
E-mail: mehonoshina.08@mail.ru

Актерский Юрий Евгеньевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
доктор военных наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий
и автоматизированных систем пожаротушения
E-mail: akterskij.y@igps.ru
Akterskij Yuri Evgenievich
St. Petersburg State Fire Service EMERCOM of Russia
Russian Federation, St. Petersburg
doctor of military sciences, professor, professor department of building fire safety
and automated fire fighting systems
E-mail: akterskij.y@igps.ru

Таранцев Александр Алексеевич

Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией
E-mail: t__54@mail.ru
Tarancev Aleksandr Alekseevich
N. S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, St. Petersburg
doctor of technical sciences, professor, head of the laboratory
E-mail: t__54@mail.ru

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL)**

УДК 621.793.5/.02+539.232
DOI 10.48612/ntp/k7n7-tv76-v88v

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ TiO₂ ПОКРЫТИЙ
НА КОНСТРУКЦИОННОЙ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

**Е. П. ГРИШИНА¹, В. Е. РУМЯНЦЕВА^{2,3}, Ю. С. ДУХОВА³, Н. С. КАСЬЯНЕНКО³,
И. В. КРАСИЛЬНИКОВ^{2,3}**

¹ Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН,
Российская Федерация, г. Иваново

² Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

³ ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: epgrishina@yandex.ru, varrym@gmail.com, juliaduhova200@mail.ru,
kasiyanenko@gmail.com, korasb@mail.ru

В данной работе предложен способ получения защитного покрытия на основе наночастиц диоксида титана, синтезированного золь-гель методом, на конструкционной высококачественной низкоуглеродистой стали. Разработан и оптимизирован технологический процесс, включающий последовательные стадии подготовки поверхности металла, нанесения покрытия и фиксацию данного покрытия на металле. Изучены морфология поверхности оксидного покрытия методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии, а также его защитные свойства в соответствии с ГОСТ 9.302-88¹.

Рассмотрены перспективы применения полученных наноструктурированных покрытий для повышения коррозионной стойкости стальных конструкций.

Ключевые слова: оксидные покрытия, диоксид титана, золь-гель метод, коррозия металлов, защитные свойства.

**DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PRODUCING TiO₂
COATINGS ON HIGH-QUALITY LOW-CARBON STRUCTURAL STEEL
FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY**

**E. P. GRISHINA¹, V. E. RUMYANTSEVA^{2,3}, Yu. S. DUKHOVA³, N. S. KASYANENKO³,
I. V. KRASILNIKOV^{2,3}**

¹ Federal State Budget Institution of Science «G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry»
of the Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, Ivanovo

² Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

³ Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo State Polytechnic University»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: epgrishina@yandex.ru, varrym@gmail.com, juliaduhova200@mail.ru,
kasiyanenko@gmail.com, korasb@mail.ru

This paper proposes a method for producing a protective coating based on titanium dioxide nanoparticles synthesized by the sol-gel method on high-quality low-carbon structural steel. A process was developed and optimized, including sequential stages of metal surface preparation, coating application, and coating fixation. The surface morphology of the oxide coating was studied using X-ray phase analysis and scanning electron microscopy, as well as its protective properties in accordance with GOST 9.302-881.

The potential applications of the resulting nanostructured coatings for improving the corrosion resistance of steel structures are discussed.

Keywords: oxide coatings, titanium dioxide, sol-gel method, metal corrosion, protective properties.

Введение

Конструкционная высококачественная низкоуглеродистая сталь марки 08кп, характеризующаяся оптимальным сочетанием технологичности, пластичности и экономической эффективности, находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Данная сталь активно используется в машиностроении для изготовления несущих элементов, в производстве промышленного оборудования, а также в строительной отрасли для возведения металлоконструкций различного функционального назначения. Основным фактором, определяющим её востребованность, является рациональное соотношение эксплуатационных характеристик и себестоимости. Однако, несмотря на указанные преимущества, эксплуатационная долговечность стали 08кп существенно ограничена вследствие её высокой коррозионной активности в агрессивных средах. Согласно статистическим данным Всемирной ассоциации сталелитейной промышленности (worldsteel), коррозионные процессы ежегодно приводят к безвозвратной потере 10–20 % глобального производства чёрных металлов, что эквивалентно приблизительно 20 млн тонн металлической продукции.

Для минимизации коррозионных потерь и обеспечения требуемого ресурса эксплуатации конструкций из низкоуглеродистых сталей в инженерной практике применяется комплекс методов защиты. К основным способам коррозионной защиты относятся: рациональный подбор коррозионностойких материалов с учётом условий эксплуатации, модификация агрессивности окружающей среды посредством ингибиторов коррозии, реализация электрохимических методов защиты (катодная и анодная), а также применение поверхностных технологий, включающих нанесение защитных покрытий и модификацию поверхностного слоя металла.

В современной инженерной практике для обеспечения коррозионной стойкости стальных конструкций все шире применяются инновационные защитные системы, в частности, композитные материалы на основе металлооксидной керамики и наноструктурированные покрытия. Особое внимание исследователей и промышленности привлекают титаносодержа-

щие системы, преимущественно диоксид титана (TiO_2), обладающий комплексом уникальных физико-химических свойств [1–12]. Ключевыми эксплуатационными характеристиками TiO_2 покрытий, определяющими их конкурентоспособность по сравнению с традиционными методами защиты, являются: высокая адгезионная прочность к стальным подложкам, обусловленная химической совместимостью и образованием прочных межфазных связей, что обеспечивает длительный срок службы защитного слоя при динамических и статических нагрузках; оптическая прозрачность в видимом спектре, сохраняющая декоративные и функциональные свойства защищаемых поверхностей без необходимости дополнительной финишной обработки; экологическая безопасность, подтвержденная отсутствием в составе токсичных летучих органических соединений и тяжелых металлов, что соответствует международным стандартам устойчивого развития и обеспечивает минимальное воздействие на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла материала.

Получение оксидных покрытий может осуществляться посредством различных методов, например, таких как импульсное лазерное осаждение [13, 14], химическое осаждение из паровой фазы [15–17], реактивное магнетронное напыление [18, 19], золь-гель метод [1–12], лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия [20] и т.д. Золь-гель метод зарекомендовал себя как эффективный способ получения оксидных покрытий для защиты металлических конструкций от коррозии, находящий широкое применение в материаловедении и промышленности [1–12]. Данная технология привлекает исследователей и инженеров благодаря ряду преимуществ: возможность проведения процесса, не требующего повышенных температур обработки, использование экологически чистых исходных материалов, позволяет получать однородные наноразмерные структуры с возможностью контроля их свойств. Кроме того, золь-гель процесс прост в исполнении и не является экономически затратным [21]. Эти факторы делают золь-гель технологию оптимальной для создания тонких наноструктурированных пленок с выдающимися диэлектрическими, абразивными, диффузион-

ными, антикоррозионными и другими функциональными свойствами.

Анализ научной литературы подтверждает актуальность исследований в области получения качественных наноструктурированных TiO_2 покрытий на металлах с помощью золь-гель технологии. Данные покрытия характеризуются улучшенными эксплуатационными свойствами, включая повышенную стойкость к коррозионным, эрозионным и абразивным воздействиям, а также прочностными и защитными характеристиками. Немаловажным фактором является также технологическая доступность и экологическая безопасность золь-гель метода. Эти соображения легли в основу определения цели настоящей работы.

Цель исследования

Настоящая работа направлена на создание и совершенствование процесса формирования наноструктурированного TiO_2 покрытия на конструкционной высококачественной низкоуглеродистой стали, который включает в себя этапы предварительной обработки

поверхности металла, нанесения защитного покрытия и его последующей фиксации.

Материалы

и методы исследования

Получение TiO_2 золь-гель системы

Коллоидный золь диоксида титана синтезирован методом кислотно-катализируемого гидролиза и конденсации тетраизопророксида титана (TTIP, $Ti(OC_3H_7)_4$, 97 %, Sigma-Aldrich) в водно-спиртовой среде. В качестве катализатора гидролитических реакций использован 0,1 М водный раствор азотной кислоты (HNO_3 , 65 %, Химмед). В стандартной методике 0,0405 М TTIP предварительно растворяли в безводном изопропиловом спирте (C_3H_7OH , 0,21 М) с последующим медленным капельным введением полученной смеси в избыток 0,1 М водного раствора HNO_3 при контролируемой температуре 70 ± 2 °С. Синтез проводили при интенсивном перемешивании и постоянной температуре 80 ± 1 °С в течение 8 часов, что обеспечило формирование стабильного, оптически прозрачного коллоидного раствора [22].

Таблица 1. Основные характеристики стали 08кп

Марка	Полное название	Химический состав, %	Назначение и применение
Сталь 08кп	Сталь нелегированная конструкционная качественная углеродистая	Железо ~ 98, углерод 0,05-0,11, кремний $\leq 0,03$, марганец 0,25-0,5, медь $\leq 0,3$, мышьяк $< 0,08$, никель $\leq 0,3$, сера $\leq 0,04$, фосфор $\leq 0,035$, хром $\leq 0,1$	Изготовление элементов, не несущих основной нагрузки, для строительной и машиностроительной индустрии

Подготовка образцов стали 08кп

В качестве объектов исследования были взяты металлические пластины стали 08кп (1,0 x 4,0 см). Характеристика конструкционной высококачественной низкоуглеродистой стали приведена в табл. 1.

Подготовка поверхности низкоуглеродистой стали марки 08кп к последующим технологическим операциям осуществлялась по многостадийной методике, включающей четыре последовательных этапа обработки. На начальной стадии проводилась предварительная очистка от органических загрязнений путем обезжиривания поверхности ацетоном. Второй этап предусматривал обезжиривание в щелочном растворе состава: $NaOH$ – 40 г/л, Na_2CO_3 – 40 г/л, Na_3PO_4 – 40 г/л. Процесс осуществлялся при интенсивном ультразвуковом воздействии (частота 37 кГц) при температуре 75 ± 2 °С в течение 15 минут, что обеспечивало эффективное удаление остаточных жировых пленок и стабилизацию поверхностной энергии металла в соответствии с требованиями ГОСТ 9.305-84. Третий этап включал двухстадийную промывку: первичное ополаскивание в горячей воде при температуре 60 ± 10 °С (1–3 минуты) и окончательное промывание в холодной проточной воде

комнатной температуры (18 ± 2 °С) в течение 1–3 минуты для полного удаления остатков щелочного раствора и продуктов коррозии. На четвертой стадии образцы подвергались сушке воздухом в сушильном шкафу при контролируемой температуре 75 ± 5 °С до полного высыхания.

Нанесение TiO_2 покрытия

Нанесение коллоидного золя диоксида титана (TiO_2) на предварительно подготовленные поверхности низкоуглеродистой стали марки 08кп осуществляли методом контролируемого кратковременного погружения (dip-coating) при стандартных условиях (23 ± 2 °С). Скорость погружения/извлечения образцов регулировалась в диапазоне 0,5–1,0 мм/с для обеспечения равномерного распределения золя и формирования монослоя с оптимальной толщиной. Непосредственно после нанесения покрытия проводили стадию нейтрализации остаточных кислотных компонентов золя парами 10 %-ного водного раствора аммиака ($NH_3 \cdot H_2O$) в течение 1–2 минут до достижения нейтрального значения pH (6,8–7,2) на поверхности образцов [23]. Данная процедура способствует стабилизации золь-гель системы и предотвращает неконтролируемую агрегацию частиц TiO_2 , а также исключает возникновение коррозионных процессов.

Для формирования многослойных функциональных покрытий с заданной толщиной и морфологией описанный цикл операций (нанесение → нейтрализация → сушка при 90 ± 5 °С в течение 5–7 минут) повторяли последовательно 2–5 раз.

В рамках экспериментальных исследований по оптимизации адгезионных характеристик покрытия, образцы подвергали заключительной термической обработке в муфельной печи при температуре 450 ± 5 °С в течение 15 минут. Данный режим термообработки обеспечивает декомпозицию органических компонентов, кристаллизацию аморфного TiO_2 в анатазную фазу и формирование прочных химических связей (Ti–O–Fe) на границе раздела «покрытие-металл», что существенно повышает механическую прочность сцепления и коррозионную стойкость композитной системы.

Методы исследования свойств TiO_2 покрытий

Для исследования структуры и строения сформированных оксидных слоев применялись методы рентгенофазового анализа (РФА) с использованием спектрометра D2 PHASER – ДРОН 2 (Bruker, Германия) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Quattro S (Thermo Fisher Scientific, Чехия). Объектами СЭМ-анализа были образцы стали 08кп с 1-м, 3-м и 5-ю слоями TiO_2 покрытия без термической обработки, а также образцы стали 08кп с 3-м и 5-ю слоями TiO_2 покрытия, подвергнутые термообработке. Толщина однослойного покрытия была измерена гравиметрическим методом по ГОСТ 9.302-88. Массу исследуемых образцов определяли с использованием аналитических весов ME 414S («Sartorius», Германия).

Оценка защитных свойств TiO_2 покрытий проводилась с применением методов, соответствующих требованиям ГОСТ 9.302-88: метод контроля внешнего вида, который дает

возможность визуально выявить дефекты покрытия; метод нанесения сетки царапин, позволяющий контролировать прочность сцепления покрытия с основным металлом; метод капли, основанный на исследовании проницаемости покрытия. После нанесения сетки царапин на TiO_2 покрытия образцы были визуализированы с помощью оптического монокулярного микроскопа «Микромед» (Россия) при 100-кратном увеличении. Для испытания защитной способности полученных покрытий на стали 08кп методом капли использовали 2 %-й раствор сернистой меди ($CuSO_4$). Согласно этому методу, покрытие можно считать выдержавшим испытание, если на его поверхности в течение 30 секунд не появятся пятна выделившейся контактной меди. Дополнительно методом капли были исследованы защитные свойства образцов стали 08кп с однослойным TiO_2 покрытием без термической обработки после сушки в сушильном шкафу (90 ± 5 °С, 5–7 мин) без дополнительного воздействия, а также выдержанных в различных агрессивных средах: холод (-18 ± 2 °С, 24 ч), горячие пары воды (100 ± 5 °С, 40 мин), кипящая вода (100 ± 5 °С, 20 мин). Кроме того, образец ст 08кп с 1-м слоем TiO_2 покрытия, высушенным на воздухе (23 ± 2 °С, 1 ч) без дополнительного воздействия.

Результаты исследования и их обсуждение

Морфология TiO_2 покрытий

Дифрактограмма диоксида титана, представленная на рис. 1, демонстрирует выраженные пики при углах 2θ : $25,326^\circ$, $37,877^\circ$, $48,092^\circ$, $53,940^\circ$ и $55,137^\circ$. Эти положения пиков характерны для диоксида титана. Согласно результатам РФА, полученный TiO_2 имеет анатазбрукитную модификацию, а средний размер его кристаллитов составляет 8,9 нм [24].

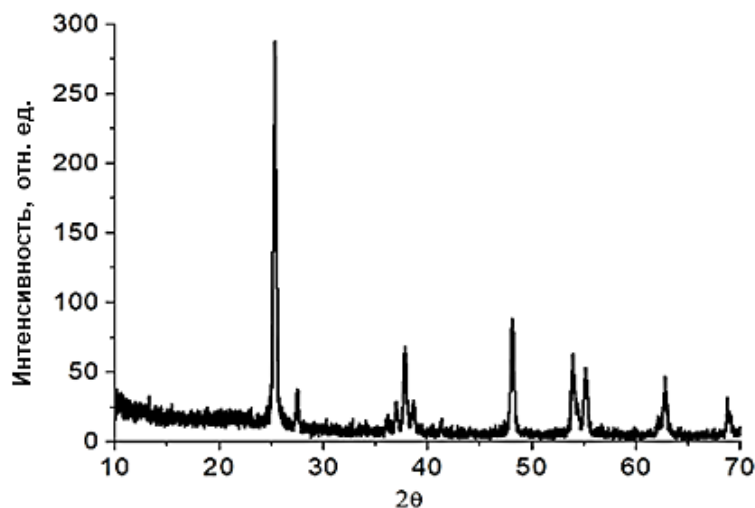


Рис. 1. Дифрактограмма диоксида титана [24]

Таблица 2. Состав золь-гель TiO_2 покрытий на стали 08кп [25]

Поверхность	Содержание элементов, %				
	Ti	C	O	Fe	Si
ст 08кп 1 слой TiO_2	30,7	5,8	63,0	0,0	0,5
ст 08кп 3 слоя TiO_2	24,1	6,1	56,7	12,6	0,5
ст 08кп 5 слоев TiO_2	29,5	4,0	62,2	4,2	0,0
термообработанная ст 08кп 3 слоя TiO_2	9,6	2,4	53,4	34,6	0,0
термообработанная ст 08кп 5 слоев TiO_2	34,7	3,8	59,9	1,6	0,0

Табл. 2 содержит данные элементного состава золь-гель TiO_2 покрытий на стали 08кп, полученные методом СЭМ.

Анализ элементного состава поверхности исследуемых образцов, представленный в табл. 2, выявил закономерность распределения титана и железа в зависимости от режимов обработки и количества нанесенных слоев. Максимальная концентрация титана (Ti) зафиксирована на поверхности термообработанных образцов низкоуглеродистой стали 08кп с пяти-слойным TiO_2 покрытием (30,7 %). Особого внимания заслуживает образец с однослойным TiO_2 покрытием без термической обработки, в спектрах рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии которого не обнаружено сигналов

железа (Fe) в поверхностном слое. Данное наблюдение свидетельствует о формировании плотного, непроницаемого барьера, эффективно предотвращающего диффузию атомов железа из подложки в покрытие при кратковременном контакте с кислотным золев. Это позволяет сделать вывод об отсутствии начальных стадий коррозионного разрушения на границе раздела «металл-покрытие» в условиях стандартного процесса нанесения [25].

Методом сканирующей электронной микроскопии были получены изображения низкоуглеродистой стали с 3-мя и 5-ю слоями TiO_2 покрытия до применения термической обработки (рис. 2) и после (рис. 3).

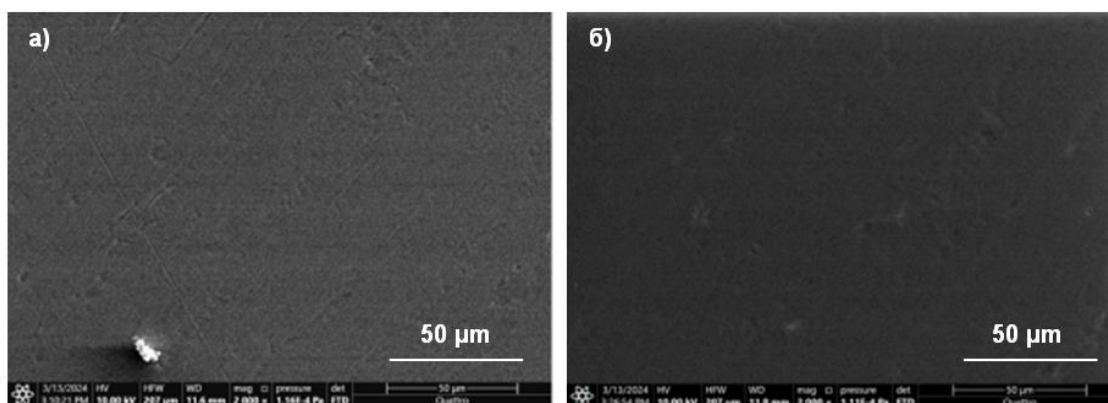


Рис. 2. Изображения СЭМ стали 08кп без термообработки: а) 3-мя слоями TiO_2 ; б) 5-ю слоями TiO_2 [25]

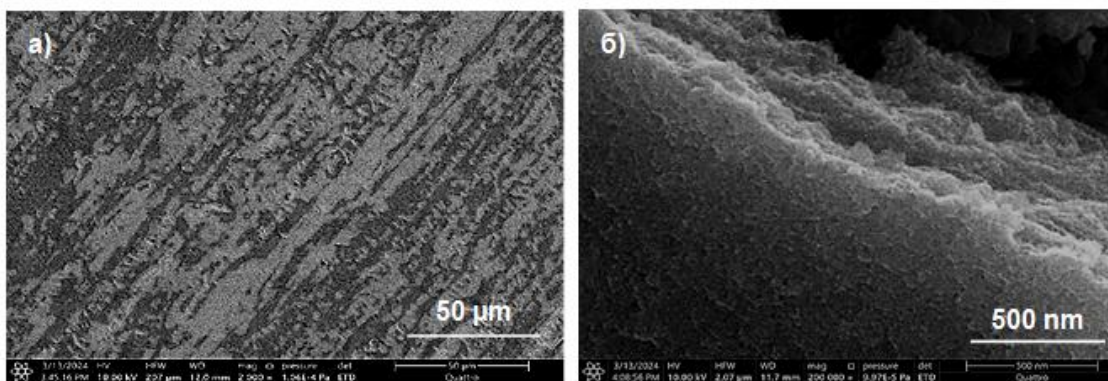


Рис. 3. Изображения СЭМ термообработанной стали 08кп: а) 3-мя слоями TiO_2 ; б) 5-ю слоями TiO_2 [25]

Анализ изображений СЭМ показал, что покрытие равномерно распределено по поверхности образцов, без видимых дефектов в виде трещин или пор. Тем не менее, на некоторых участках наблюдается беспорядочное скопление частиц (рис. 2а, б). На термообработанной стали с 3-мя слоями TiO_2 структура покрытия хорошо различима (рис. 3а). Увеличение числа слоев TiO_2 покрытия приводит к утолщению и повышению слоистости покрытия (рис. 3б) [25].

Защитные свойства TiO_2 покрытий

Полученные керамические покрытия отличаются не только эстетичным и прозрачным внешним видом, но и высокой адгезией к металлической подложке. Исследование прочности сцепления покрытий методом нанесения сетки царапин показало, что образцы с 1-м и 3-мя слоями TiO_2 демонстрируют наилучшее сцепление с основным металлом. Это подтверждается отсутствием отслоений покрытия между линиями и в сетке квадратов, как для образцов

без термической обработки (рис. 4а, б), так и для образцов, подвергшихся термической обработке (рис. 4в, г) [26].

Результаты испытаний методом капли показали, что образец стали без термической обработки с пятислойным TiO_2 покрытием, значительно превосходит образец без покрытия. Время его устойчивости в 2 %-м растворе сернокислой меди ($CuSO_4$) составило 11,5 минут, тогда как контрольный образец продержался лишь 2,5 минуты (табл. 3).

Исследование защитных свойств полученных оксидных покрытий с применением метода капли в различных экспериментальных условиях выявило, что наилучшую защиту демонстрируют однослойные TiO_2 покрытия после сушки при комнатной температуре (23 ± 2 °C, 1 ч) или при повышенной температуре (90 ± 5 °C, 5–7 мин), прошедшие стадию нейтрализации в парах 10 %-го раствора аммиака без каких-либо дополнительных воздействий (табл. 4).

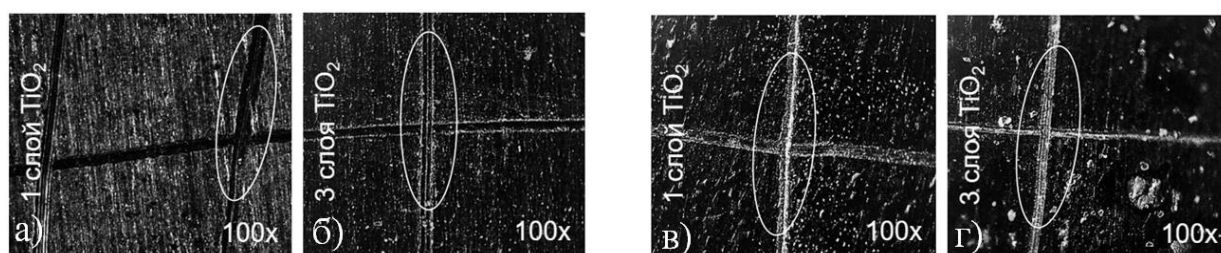


Рис. 4. Микрофотографии TiO_2 покрытия на стали 08кп после нанесения сетки царапин: а), б) без термообработки; в), г) с термообработкой [26]

Таблица 3. Зависимость времени появления контактной меди на поверхности ст 08кп от количества слоев TiO_2 покрытия при воздействии 2 %-го раствора $CuSO_4$

Образец	Количество слоев TiO_2 покрытия	Время появления контактной меди, мин
ст 08кп	0	2,5
	1	5
	2	4
	3	10
	4	10
	5	11,5
термообработанная ст 08кп	0	2,5
	1	0,5
	2	0,5
	3	0,5
	4	0,5
	5	0,5

Таблица 4. Зависимость времени появления контактной меди на поверхности ст 08кп с 1-м слоем TiO_2 покрытия от различных экспериментальных условий при воздействии 2 %-го раствора $CuSO_4$

Ст 08кп с 1-м слоем TiO_2 покрытия	Время появления контактной меди, мин
После сушки в сушильном шкафу ($90 \pm 5^\circ C$, 5-7 мин)	
Без дополнительного воздействия	5
Выдержка в морозильной камере ($-18 \pm 2^\circ C$, 24 ч)	2,5
Выдержка в горячих парах воды ($100 \pm 5^\circ C$, 40 мин)	2,5
Выдержка в кипящей воде ($100 \pm 5^\circ C$, 20 мин)	1
После сушки на воздухе ($23 \pm 2^\circ C$, 1 ч)	
Без дополнительного воздействия	3

Заключение

В данном исследовании разработана и экспериментально обоснована методика формирования функциональных керамических покрытий на основе диоксида титана на поверхности конструкционной низкоуглеродистой стали марки 08кп с применением золь-гель-технологии. Технологический цикл включает три ключевых этапа: предварительную подготовку металлической поверхности, нанесение наноструктурированного покрытия методом контролируемого погружения и стадию его фиксации. Проведен анализ морфологии поверхности полученных образцов и их оценка коррозионной стойкости.

Ключевой инновационной особенностью предложенной методики является введение стадии нейтрализации поверхности стали после нанесения золь TiO_2 в атмосфере паров 10 %-ного водного раствора аммиака. Данная процедура обеспечивает стабилизацию поверхностного состояния покрытия и предотвращает локальное кислотное коррозионное воздействие на низкоуглеродистую сталь при контакте с исходным золев, имеющим низкое значение pH. Экспериментальные исследования показали, что реализация нейтрализации способствует формированию покрытий с высокой адгезионной прочностью, визуальной однородностью, отсутствием макроскопических дефектов (трещин, пор, включений) и возможностью послойного наращивания толщины. Установлено, что применение высокотемпературной обработки ($450 \pm 5^\circ C$) к многослойным TiO_2 покрытиям приводит к растрескиванию в результате его сжатия.

Керамическое покрытие продемонстрировало хорошие защитные свойства в

испытании методом капли по ГОСТ 9.302-88. Наибольшую коррозионную стойкость продемонстрировали образцы с пятислойным покрытием без термической обработки, что обусловлено формированием непрерывного барьерного слоя с минимальной проницаемостью для агрессивных сред.

Систематические исследования в различных эксплуатационных условиях выявили, что оптимальным соотношением защитных свойств и технологичности обладают однослойные TiO_2 покрытия толщиной 184 ± 15 нм. Максимальная эффективность достигается при условии предварительной нейтрализации поверхности в парах 10 %-ного аммиачного раствора с последующей сушкой на воздухе при комнатной ($23 \pm 2^\circ C$) или при повышенной температуре ($90 \pm 5^\circ C$) без дополнительного воздействия. Установлено, что эксплуатационная надежность покрытий существенно снижается при воздействии экстремальных факторов: низких температур, горячего водяного пара и кипящей воды, что связано с дестабилизацией структуры покрытия и нарушением адгезионного контакта [27–29].

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования золь-гель метода для создания защитных систем на конструкционных металлах. Разработанные наноструктурированные TiO_2 покрытия обеспечивают увеличение коррозионной стойкости низкоуглеродистой стали в агрессивных средах, что открывает возможности для практического применения в машиностроении, химической промышленности, а также в строительной индустрии при условии соблюдения оптимальных режимов эксплуатации.

Список литературы

1. Sajjadi S. A., Ahmadi N. P., Yazdani S. Corrosion behavior of sol-gel coated amorphous alumina at different calcination temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 405 (2), 33 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126546.
2. Balamurugan A., Kannan S., Rajeswari S. Evaluation of TiO₂ coatings obtained using the sol-gel technique on surgical grade type 316L stainless steel in simulated body fluid. *Mater. Lett.*, 2005, vol. 59 (24-25), pp. 3138–3143. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.05.036.
3. Jeeva J. K., Palanivelu K. Anticorrosion coatings on SS 304 by incorporation of Pr₆O₁₁-TiO₂ in siloxane network. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, vol. 51 (6), pp. 589–597. DOI: 10.3103/S1068375515060083.
4. Corrosion protection of mild steel by applying TiO₂ nanoparticle coating via sol-gel method / A. Shanaghi, A. R. Sabour, T. Shahrabi [et al.]. *Prot. Met.*, 2009, vol. 45 (3), pp. 305–311. DOI: 10.1134/s2070205109030071.
5. Shen G. X., Chen Y. C., Lin C. J. Corrosion protection of 316L stainless steel by a TiO₂ nanoparticle coating prepared by sol-gel method. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 489 (1-2), pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.05.016.
6. Liu T. Structure stability and corrosion resistance of nano-TiO₂ coatings on aluminum in seawater by a vacuum dip-coating method. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, vol. 205, issue 7, pp. 2335–2339. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.09.028.
7. An experimental investigation of corrosion resistance of mild steel by sol-gel process using TiO₂ nanostructure coating and prediction of optimal parameters / A. Shanaghi [et al.]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: J. Nanoeng. Nanosyst*, 2013, vol. 227, issue 2, pp. 105–111. DOI: 10.1177/1740349912464930.
8. Sol-gel synthesis, characterization and properties of TiO₂ and Ag-TiO₂ coatings on titanium substrate / N. Cotoian [et al.]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 790–799. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.082.
9. Heshmati M., Amiri S., Hosseini-Zori M. Synthesis and characterization of superhydrophobic-superoleophobic and anti-corrosion coatings via sol-gel process. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 2020, vol. 10, pp. 1–15. DOI: 10.4236/ojopm.2020.101001.
10. Bouzbib M., Marouani M., Sinkó K. Effect of various additives on aluminum oxide thin films prepared by dip coating, thermal behavior, kinetics and optical properties. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2021, vol. 17 (1), 12 p. DOI: 10.1186/s41476-021-00170-x.
11. Karimi L. S., Amiri S., Zori M. H. Synthesis and characterization of anti-scratch and anti-corrosion hybrid nanocomposite coatings based on sol-gel process. *Silicon*, 2021, vol. 13 (2001), pp. 1–13. DOI: 10.1007/s12633-020-00721-w.
12. Castro Y., Özmen E., Durán A. Integrated self-healing coating system for outstanding corrosion protection of AA2024. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 387 (1), pp. 125521. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125521.
13. Titanium oxide nanostructured films by reactive pulsed laser deposition / M. Fusi [et al.]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, vol. 255 (10), pp. 5334–5337. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.206.
14. Thermoluminescence properties of aluminum oxide thin films obtained by pulsed laser deposition / J. E. Villarreal-Barajas [et al.]. *Radiation Measurements*, 2002, vol. 35 (4), pp. 355–359. DOI: 10.1016/s1350-4487(02)00062-8.
15. Structural and Photoelectrochemical Properties of DC Magnetron-Sputtered TiO₂ Layers on FTO / A. Kruth [et al.]. *J. Phys. Chem. C.*, 2014, vol. 118 (43), pp. 25234–25244. DOI: 10.1021/jp507487c.
16. Mechanical and Surface Properties of Chemical Vapor Deposited Protective Aluminium Oxide Films on TA6V Alloy / D. Samélor [et al.]. *Advances in Science and Technology*, 2010, vol. 66, pp. 66–73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/as.
17. Corrosion of flame-assisted CVD silica-coated steel sheet / R. Hausbrand, B. Bolado-Escudero, A. Dhont [et al.]. *Corrosion Science*, 2012, vol. 61, pp. 28–34. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.04.007.
18. Reactive sputtered TiO₂ thin film humidity sensor with negative substrate bias / L. L. W. Chow, M. M. F. Yuen, P. C. H. Chan [et al.]. *Sens. Actuators B: Chemical*, 2001, vol. 76 (1-3), pp. 310–315. DOI: 10.1016/s0925-4005(01)00602-5.
19. Properties of aluminium oxide thin films deposited in high effective reactive pulsed magnetron sputtering process / K. Tadaszak, K. Nitsch, T. Piasecki [et al.]. *Materials Science-Poland*, 2012, vol. 30 (4), pp. 323–328. DOI: 10.2478/s13536-012-0058-4.
20. Epitaxial growth of bronze phase titanium dioxide by molecular beam epitaxy / W. Guo [et al.]. *AIP Advances*, 2019, vol. 9 (3), 035230 p. DOI: 10.1063/1.5089906.
21. Figueira R. B., Silva C. J. R., Pereira E. V. Organic-inorganic hybrid sol-gel coatings for metal corrosion protection: a review of recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2014, vol. 12 (1), pp. 1–35. DOI: 10.1007/s11998-014-9595-6.
22. Development of the low-temperature sol-gel synthesis of TiO₂ to provide self-cleaning effect on the textile materials / O. L. Galkina, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov [et al.]. *Nanotechnologies in Russia*,

2012, vol. 7, issue 11–12, pp. 604–614. DOI: 10.1134/S1995078012060031.

23. Grishina E. P., Kudryakova N. O., Ramenskaya L. M. Thin-film Al₂O₃ coating on low carbon steel obtained by the sol–gel method with different peptizing acids: Corrosion investigation. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 746, pp. 125–139.

24. Духова Ю. С., Комарова Т. А. Изучение структуры диоксида титана методом рентгеновского фазового анализа // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2021): сборник материалов Национальной молодёжной научно-технической конференции. Иваново: ИВГПУ. 2021. С. 302–304.

25. Духова Ю. С. Золь-гель TiO₂ покрытия на нелегированной углеродистой стали // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2024. С. 446–450.

26. Духова Ю. С., Гришина Е. П., Румянцева В. Е. Изучение защитных свойств золь-гель TiO₂ покрытия на нелегированной углеродистой стали // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Иваново: ИВГПУ. 2025. С. 237–240.

27. Трансформация прочности бетона при эксплуатации конструкции в агрессивной воздушной среде с изменяющимися параметрами / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, У. А. Новикова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 158–168.

28. Гетерогенные физико-химические процессы массопереноса агрессивных веществ в структуре бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовой среде с изменяющимися параметрами / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 142–152.

29. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *Chem-ChemTech*, 2022, vol. 65, issue 7, pp. 61–70.

References

1. Sajjadi S. A., Ahmadi N. P., Yazdani S. Corrosion behavior of sol-gel coated amorphous alumina at different calcination temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 405 (2), 33 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126546.

2. Balamurugan A., Kannan S., Rajeswari S. Evaluation of TiO₂ coatings obtained using the sol–gel technique on surgical grade type 316L stainless steel in simulated body fluid. *Mater. Lett.*, 2005, vol. 59 (24-25), pp. 3138–3143. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.05.036.

3. Jeeva J. K., Palanivelu K. Anticorrosion coatings on SS 304 by incorporation of Pr₆O₁₁–TiO₂ in siloxane network. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, vol. 51 (6), pp. 589–597. DOI: 10.3103/S1068375515060083.

4. Corrosion protection of mild steel by applying TiO₂ nanoparticle coating via sol-gel method / A. Shanaghi, A. R. Sabour, T. Shahrabi [et al.]. *Prot. Met.*, 2009, vol. 45 (3), pp. 305–311. DOI: 10.1134/s2070205109030071.

5. Shen G. X., Chen Y. C., Lin C. J. Corrosion protection of 316L stainless steel by a TiO₂ nanoparticle coating prepared by sol–gel method. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 489 (1-2), pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.05.016.

6. Liu T. Structure stability and corrosion resistance of nano-TiO₂ coatings on aluminum in seawater by a vacuum dip-coating method. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, vol. 205, issue 7, pp. 2335–2339. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.09.028.

7. An experimental investigation of corrosion resistance of mild steel by sol-gel process using TiO₂ nanostructure coating and prediction of optimal parameters / A. Shanaghi [et al.]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: J. Nanoeng. Nanosyst*, 2013, vol. 227, issue 2, pp. 105–111. DOI: 10.1177/1740349912464930.

8. Sol-gel synthesis, characterization and properties of TiO₂ and Ag-TiO₂ coatings on titanium substrat / N. Cotelan [et al.]. *Surface & Coatings Technolog.*, 2016, vol. 307, pp. 790–799. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.082.

9. Heshmati M., Amiri S., Hosseini-Zori M. Synthesis and characterization of superhydrophobic-superoleophobic and anti-corrosion coatings via sol-gel process. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 2020, vol. 10, pp. 1–15. DOI: 10.4236/ojopm.2020.101001.

10. Bouzbib M., Marouani M., Sinkó K. Effect of various additives on aluminum oxide thin films prepared by dip coating, thermal behavior, kinetics and optical properties. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2021, vol. 17 (1), 12 p. DOI: 10.1186/s41476-021-00170-x.

11. Karimi L. S., Amiri S., Zori M. H. Synthesis and characterization of anti-scratch and anti-corrosion hybrid nanocomposite coatings based on sol-gel process. *Silicon*, 2021, vol. 13 (2001), pp. 1–13. DOI: 10.1007/s12633-020-00721-w.

12. Castro Y., Özmen E., Durán A. Integrated self-healing coating system for outstanding corrosion protection of AA2024. *Surface and*

Coatings Technology, 2020, vol. 387 (1), pp. 125521 DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125521.

13. Titanium oxide nanostructured films by reactive pulsed laser deposition / M. Fusi [et al.]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, vol. 255 (10), pp. 5334–5337. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.206.

14. Thermoluminescence properties of aluminum oxide thin films obtained by pulsed laser deposition / J. E. Villarreal-Barajas [et al.]. *Radiation Measurements*, 2002, vol. 35 (4), pp. 355–359. DOI: 10.1016/s1350-4487(02)00062-8.

15. Structural and Photoelectrochemical Properties of DC Magnetron-Sputtered TiO₂ Layers on FTO / A. Kruth [et al.]. *J. Phys. Chem. C.*, 2014, vol. 118 (43), pp. 25234–25244. DOI: 10.1021/jp507487c.

16. Mechanical and Surface Properties of Chemical Vapor Deposited Protective Aluminium Oxide Films on TA6V Alloy / D. Samélor [et al.]. *Advances in Science and Technology*, 2010, vol. 66, pp. 66–73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/as.

17. Corrosion of flame-assisted CVD silica-coated steel sheet / R. Hausbrand, B. Bolado-Escudero, A. Dhont [et al.]. *Corrosion Science*, 2012, vol. 61, pp. 28–34. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.04.007.

18. Reactive sputtered TiO₂ thin film humidity sensor with negative substrate bias / L. L. W. Chow, M. M. F. Yuen, P. C. H. Chan [et al.]. *Sens. Actuators B: Chemical*, 2001, vol. 76 (1-3), pp. 310–315. DOI: 10.1016/s0925-4005(01)00602-5.

19. Properties of aluminium oxide thin films deposited in high effective reactive pulsed magnetron sputtering process / K. Tadaszak, K. Nitsch, T. Piasecki [et al.]. *Materials Science-Poland*, 2012, vol. 30 (4), pp. 323–328. DOI: 10.2478/s13536-012-0058-4.

20. Epitaxial growth of bronze phase titanium dioxide by molecular beam epitaxy / W. Guo [et al.]. *AIP Advances*, 2019, vol. 9 (3), 035230 p. DOI: 10.1063/1.5089906.

21. Figueira R. B., Silva C. J. R., Pereira E. V. Organic–inorganic hybrid sol–gel coatings for metal corrosion protection: a review of recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2014, vol. 12 (1), pp. 1–35. DOI: 10.1007/s11998-014-9595-6.

22. Development of the low-temperature sol-gel synthesis of TiO₂ to provide self-cleaning effect on the textile materials / O. L. Galkina, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov [et al.]. *Nanotechnologies in Russia*, 2012, vol. 7, issue 11–12, pp. 604–614. DOI: 10.1134/S1995078012060031.

23. Grishina E. P., Kudryakova N. O., Ramenskaya L. M. Thin-film Al₂O₃ coating on low

carbon steel obtained by the sol–gel method with different peptizing acids: Corrosion investigation. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 746, pp. 125–139.

24. Dukhova Yu. S., Komarova T. A. *Izuchenie struktury` dioksida titana metodom rentgenovskogo fazovogo analiza [Study of the structure of titanium dioxide by X-ray phase analysis]. Molody'e ucheny'e – razvitiyu Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy` (POISK – 2021): sbornik materialov Nacional'noj molodyozhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii.* Ivanovo: IVGPU, 2021, pp. 302-304.

25. Dukhova Yu. S. *Zol'-gel` TiO2 pokry'tiya na nelegirovannoy uglerodistoj stali [Sol-gel TiO₂ coatings on unalloyed carbon steel]. Nadezhnost` i dolgovechnost` mashin i mexanizmov: sbornik materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii.* Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2024, pp. 446-450.

26. Dukhova Yu. S., Grishina E. P., Rummyantseva V. E. *Izuchenie zashhitny'x svoystv zol'-gel` TiO2 pokry'tiya na nelegirovannoy uglerodistoj stali [Study of protective properties of sol-gel TiO₂ coating on unalloyed carbon steel]. Kachestvo zhizni: arkhitektura, stroitel'stvo, transport, obrazovanie: sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii.* Ivanovo: IVGPU, 2025, pp. 237–240.

27. Transformatsiya prochnosti betona pri ekspluatatsii konstruksii v agressivnoi vozduшной srede s izmenyayushchimisya parametrami [Transformation of concrete strength during operation of a structure in an aggressive air environment with changing parameters] / V. Ye. Rummyantseva, I. V. Krasilnikov, U. A. Novikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchiti*, 2023, vol. 3 (48), pp. 158–168.

28. Geterogennye fiziko-khimicheskie protsessy massoperenosa agressivnykh veshchestv v strukture betona zhelezobetonnykh konstruksii, ekspluatiruemykh v gazovoi srede s izmenyayushchimisya parametrami [Heterogeneous physical and chemical processes of mass transfer of aggressive substances in the structure of concrete of reinforced concrete structures operated in a gas environment with changing parameters] / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoi zashchiti*, 2022, vol. 4 (45), pp. 142–152.

29. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *Chem-ChemTech*, 2022, vol. 65, issue 7, pp. 61–70.

Гришина Елена Павловна

Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН,
Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
«Химические и электрохимические процессы в ионных жидкостях и композитах на их основе»

E-mail: epgrishina@yandex.ru

Grishina Elena Pavlovna

Federal State Budget Institution of Science «G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry» of the Russian
Academy of Sciences,

Russian Federation, Ivanovo

doctor of technical sciences, associate professor, chief researcher, head of the laboratory of «Chemical
and electrochemical processes in ionic liquids and composites based on them»

E-mail: epgrishina@yandex.ru

Румянцева Варвара Евгеньевна

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, член-корреспондент РИА
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

профессор кафедры естественнонаучных дисциплин

ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,

Российская Федерация, г. Иваново

проректор по науке и инновациям

E-mail: varrym@gmail.com

Rumyantseva Varvara Evgenievna

doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the RAACS, corresponding member
of RAE

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy
of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

professor of the department of natural sciences

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo State Polytechnic
University»,

Russian Federation, Ivanovo

vice-rector for science and innovation

E-mail: varrym@gmail.com

Духова Юлия Сергеевна

ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,

Российская Федерация, г. Иваново

ассистент кафедры естественных наук и техносферной безопасности, аспирант очной формы
обучения кафедры естественных наук и техносферной безопасности

E-mail: juliaduhova200@mail.ru

Dukhova Yulia Sergeevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo State Polytechnic
University»,

Russian Federation, Ivanovo

assistant of the department of natural sciences and technosphere safety, postgraduate student

of the department of natural sciences and technosphere safety

E-mail: juliaduhova200@mail.ru

Касьяненко Наталья Сергеевна

ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности

E-mail: kasiyanenko@gmail.com

Kasyanenko Natalya Sergeevna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo State Polytechnic University»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences, associate professor of the department of natural sciences and technosphere safety

E-mail: kasiyanenko@gmail.com

Красильников Игорь Викторович

доктор технических наук, доцент, советник РААСН, академический советник РИА

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, доцент, советник РААСН, академический советник РИА

и.о. заведующего кафедрой естественных наук и техносферной безопасности, профессор кафедры строительства и инженерных систем, руководитель центра научно-исследовательских работ и технической экспертизы

ФГБОУ ВО Ивановский государственный политехнический университет,

Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: korasb@mail.ru

Krasilnikov Igor Viktorovich

doctor of technical sciences, associate professor, advisor to the RAACS, academic advisor to RAE

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

doctor of technical sciences, associate professor, advisor to the RAACS, academic advisor to RAE

acting head of the department of natural sciences and technosphere safety, professor of the department

of construction and engineering systems, head of the center for research and technical expertise

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo State Polytechnic

University»,

Russian Federation, Ivanovo

E-mail: korasb@mail.ru

УДК 621.928, 621.929
DOI 10.48612/ntp/upe4-5148-gk7x

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРООЖИЖЕННОМ СЛОЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

**В. А. ОГУРЦОВ, А. В. ШЕНБЕРЕВА, Ю. В. ХОХЛОВА,
Вс. А. ОГУРЦОВ, А. Д. ПАРАМОНОВ, Н. С. КАСЬЯНЕНКО**
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, sshenbereva@gmail.com, hohjul@mail.ru,
willdday@yandex.ru, 9109800120@mail.ru, kasianenko@gmail.com

Процессы фракционирования и перемешивания сыпучих строительных материалов являются ключевыми этапами подготовки сырья для производства высококачественных строительных изделий. От их эффективности напрямую зависят качество продукции, энергопотребление и себестоимость. В современных условиях промышленность сталкивается с зависимостью от импортного оборудования для переработки сыпучих сред – вибрационных грохотов и смесителей, стоимость которых достигает 30 млн рублей за единицу, а запасные части и обслуживание формируют устойчивую внешнюю зависимость. Это противоречит задачам технологического суверенитета и импортозамещения, поставленным государством.

Несмотря на широкое применение, фундаментальные механизмы движения частиц в виброожигенных слоях остаются недостаточно изученными. Современные теоретические модели не позволяют прогнозировать поведение многокомпонентных дисперсных систем при изменении режимных и конструктивных параметров. Эмпирический подход доминирует в проектировании, что снижает эффективность оборудования и увеличивает затраты.

Целью настоящей работы является разработка универсальной стохастической модели процессов виброгрохочения и виброперемешивания, основанной на аппарате цепей Маркова. Предлагаемая модель позволяет описывать кинетику обоих процессов на единой математической основе, что представляет собой научную новизну описания движения ансамбля частиц в виброожигенном слое. Для этого предлагается использовать ячеечный подход, где рабочий объем аппарата делится на зоны (ячейки), а переход частиц между ними описывается вероятностями. Разработана одномерная модель для периодического грохочения и перемешивания. Показано, что известные качественные закономерности этих процессов (например, асимптотическое стремление эффективности грохочения к максимуму или снижение неоднородности смеси до минимума) могут быть получены в результате численного эксперимента по предложенной модели. Результаты подтверждают адекватность и перспективность применения стохастических моделей для решения задач цифрового моделирования и оптимизации технологий переработки сыпучих материалов. Данное исследование имеет прямую связь с темой гражданской защиты, так как повышение качества и надежности строительных материалов, производимых с использованием таких моделей, напрямую влияет на долговечность, прочность и безопасность зданий и сооружений, особенно в сейсмоактивных и экстремальных климатических зонах.

Ключевые слова: сыпучие материалы, грохочение, перемешивание, цепи Маркова, вектор состояния, матрица переходных вероятностей.

STOCHASTIC MODELING OF FRACTIONATION AND MIXING PROCESSES OF FRACTURED CONSTRUCTION MATERIALS IN A VIBRATING LIQUID SLAB BASED ON MARKOV CHAIN THEORY

**V. A. OGURTSOV, A. V. SHASHENBEREVA, Yu. V. KHOKHLOVA,
Vs. A. OGURTSOV, A. D. PARAMONOV, N. S. KASYANENKO**
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, sshenbereva@gmail.com, hohjul@mail.ru,
willdday@yandex.ru, 9109800120@mail.ru, kasianenko@gmail.com

The processes of fractionation and mixing of loose construction materials are key stages in the preparation of raw materials for the production of high-quality construction products. The quality of the products, energy consumption, and cost depend directly on the efficiency of these processes. In today's conditions, the industry faces a dependence on imported equipment for processing loose media, such as vibrating screens and mixers, which can cost up to 30 million rubles per unit, and spare parts and maintenance create a stable external dependence. This contradicts the goals of technological sovereignty and import substitution set by the government.

Despite their widespread use, the fundamental mechanisms of particle motion in fluidized beds remain insufficiently studied. Current theoretical models do not allow for predicting the behavior of multi-component dispersed systems when changing operating and design parameters. An empirical approach dominates in design, which reduces equipment efficiency and increases costs.

The aim of this work is to develop a universal stochastic model of the processes of vibro-screening and vibro-mixing, based on the Markov chain apparatus. The proposed model allows to describe the kinetics of both processes on a single mathematical basis, which represents a scientific novelty. To do this, it is proposed to use a cell approach, where the working volume of the apparatus is divided into zones (cells), and the transition of particles between them is described by probabilities. A one-dimensional model for periodic screening and mixing has been developed. It is shown that the known qualitative patterns of these processes (for example, the asymptotic approach of the efficiency of screening to a maximum or the reduction of the heterogeneity of the mixture to a minimum) can be obtained as a result of a numerical experiment using the proposed model. The results confirm the adequacy and prospects of using stochastic models for solving problems of digital modeling and optimization of technologies for processing bulk materials.

Keywords: bulk materials, screening, mixing, Markov chains, state vector, transition probability matrix.

Введение

Производство высококачественных строительных материалов, таких как автоклавный газобетон, сборные железобетонные конструкции и специализированные сухие смеси, требует точного контроля за фракционным составом исходного сырья и однородностью конечного продукта. Нарушение этих параметров приводит к снижению прочности, морозостойкости и долговечности изделий, что ставит под угрозу безопасность эксплуатации зданий и сооружений. В условиях роста урбанизации и усиления экологических и техногенных рисков, обеспечение надежности строительных конструкций становится одной из ключевых задач гражданской защиты населения и инфраструктуры.

Фракционирование (виброгрохочение) и перемешивание являются основными операциями на предприятиях строительной индустрии. Однако традиционные методы настройки и проектирования соответствующего оборудования часто носят эмпирический характер. Это приводит к значительным потерям времени и ресурсов на пуско-наладочные работы и снижает общую эффективность производства. Существующие импортные образцы вибрационного оборудования, хотя и обладают высокой производительностью, создают зависимость от внешних поставщиков, что противоречит стратегическим целям технологического суверенитета России.

В связи с этим, актуальным направлением является создание отечественных, научно обоснованных методик расчета и оптимизации

процессов переработки сыпучих материалов. В работах В.Е. Мизонова, Е.А. Баранцевой, А.В. Митрофанова, В.А. Огурцова, Н. Berthiaux, A. Camelo, K. Tannous, D. Chakraborty, D. Ramkrishna показана применимость стохастических моделей, основанных на теории цепей Маркова, для описания кинетики процессов перемешивания сыпучих материалов (чаще всего в аппаратах лопастного типа), моделирование процессов тепло-массопереноса в кипящем (псевдооживленном) слое, грохочение, дробление и другие [1 – 4]. В этих работах для каждого процесса рассматривалась своя модель. Однако комплексная, универсальная модель, способная описывать как грохочение, так и перемешивание на единой математической основе, до настоящего времени не была предложена.

Целью данной работы является разработка и апробация такой универсальной стохастической модели процессов фракционирования и перемешивания сыпучих материалов в виброоживленном слое.

Методология

Процессы перемешивания и фракционирования дисперсной среды в поле вибраций для получения сыпучих строительных материалов с заданным качеством фракционных составов имеют единую стохастическую природу. Именно эта стохастичность делает адекватным математическим аппаратом для их описания теорию случайных процессов. В качестве первой и наиболее эффективной модели для изучения динамики отдельных частиц в таком

сложном ансамбле предлагается использовать однородные цепи Маркова, которые успешно применялись для описания процессов в системах со случайными свойствами. Данный подход позволяет абстрагироваться от чрезвычайно сложного детерминированного описания взаимодействия тысяч частиц и представить их движение как последовательность случайных переходов между дискретными состояниями.

Модель предполагает дискретизацию рабочей зоны вибрационного грохота или смесителя на систему взаимодействующих ячеек идеального смешения. Слой сыпучего материала состоит из частиц разного размера, поэтому следует отметить, что модель рассматривает миграцию по виброоживленному слою частиц определенной фракции, которую будем считать ключевым компонентом. Слой сыпучего

материала разделен на m дискретных ячеек (рис. 1). Таким образом, совокупность всех m ячеек описывает весь диапазон возможных локаций частиц ключевого компонента.

Каждая ячейка характеризуется своей вероятностью S нахождения в ней этих частиц в произвольный момент времени. Набор вероятностей формирует вектор состояния, сумма компонентов которого тождественно равна единице, определяющийся как

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix}. \quad (1)$$

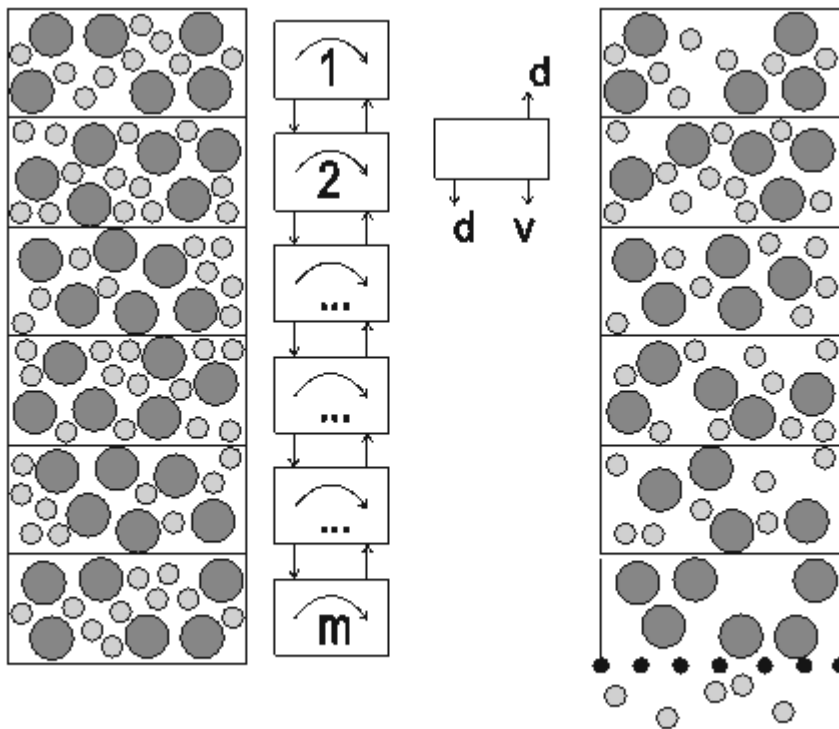


Рис. 1. Модель цепи Маркова для процессов перемешивания и грохочения, вероятности возможных межъячеечных переходов частиц ключевого компонента

Динамика переноса материальных компонентов определяется матричным оператором переходных вероятностей, формализу-

ющим механизмы межъячеечного массообмена, который определяется как

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - d - v & d & \dots & 0 & 0 \\ d + v & 1 - 2d - v & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d + v & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 - 2d - v & d \\ 0 & 0 & \dots & d + v & 1 - d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где d – безразмерный коэффициент макродиффузии, v – безразмерная скорость сегрегационного расслоения. Диффузионный перенос равновероятен и возможен как вверх по ячейкам цепи, так и вниз. Сегрегационный перенос частиц ключевого компонента направлен строго вниз.

Развитие цепи во времени определяется последовательностью матричных преобразований

$$S^{k+1} = PS^k \quad (3)$$

Методология исследования предполагает представление эволюции системы на дискретной временной шкале с элементарным шагом Δt . В рамках данного подхода интервал времени Δt определяет фундаментальный микропроцесс, в течение которого реализуется принцип локальности переходов: частицы ключевого компонента могут мигрировать исключительно в смежные состояния (ячейки), что соответствует физическому ограничению на дальнейшие скачки в конфигурационном пространстве. Дискретная временная ось формализуется соотношением:

$$t_k = k\Delta t, \quad (4)$$

где порядковый номер перехода k ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) служит целочисленным дискретным аналогом непрерывного времени. Дискретизация сохраняет топологию временной эволюции при соблюдении условия Δt существенно меньше характерного времени процесса.

После выполнения процедуры параметрической идентификации, в результате которой определены стохастические коэффициенты d (диффузионный перенос) и V (сегрегационное расслоение), кинетика процесса гомогенизации (перемешивания) полностью детерминируется системой рекуррентных матричных уравнений (1)-(3). Эта система описывает эволюцию вектора состояния S^k во времени, моделируя перераспределение частиц между ячейками идеального смешения.

Для адаптации базовой модели к процессу сепарации на вибрационном сите (грохотение) требуется введение дополнительного механизма, учитывающего извлечение в подситовое пространство частиц фракций, имеющих размер меньший размера отверстий сита. Пусть m – индекс ячейки, примыкающей к просеивающей поверхности. На каждом $(k+1)$ -ом временном шаге из состояния S_m^{k+1} исключается доля проходных частиц $q^{(k+1)}$, описываемая соотношением:

$$q^{(k+1)} = S_m^{k+1} v_f, \quad (5)$$

где v_f – вероятность сепарации, определяемая как доля частиц ключевого компонента (с диаметром, меньшим апертуры сита), которые, достигнув просеивающей поверхности в течение интервала Δt , покидают рабочий объем, переходя в подрешетный продукт. Следовательно, после акта сепарации состояние ячейки m должно быть скорректировано оператором присваивания:

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f) \quad (6)$$

Данная операция отражает мгновенное уменьшение концентрации частиц проходовой фракции в приграничной ячейке в результате их успешного просеивания. Таким образом, исходная модель, дополненная сепарационным членом v_f приобретает универсальность, позволяя единым стохастическим аппаратом описывать как процессы смешения, так и процессы классификации сыпучих сред.

Предлагаемый методологический аппарат вводит фундаментальное понятие вектора состояния системы, представляющего собой формализованный образ исследуемого объекта – виброактивированного слоя сыпучего материала в рабочей камере аппарата. Эволюция данного вектора во времени описывается уравнением (1), которое математически воплощает пространственно-временное распределение концентрации частиц целевой фракции по дискретизированному объему. Таким образом, многомерный вектор состояния служит цифровым двойником физической реальности, позволяя отслеживать изменение относительного содержания частиц в каждой элементарной ячейке системы.

Ключевым оператором, управляющим динамикой вектора состояния, выступает матрица переходных вероятностей (2). Данная матрица является математической репрезентацией внешнего энергетического воздействия на дисперсную среду – будь то вибрация сита грохота или колебания рабочей камеры смесителя. Через свои элементы, выраженные стохастическими коэффициентами (диффузии d и сегрегации v), матрица кодирует законы миграции частиц, определяя вероятности их перехода между соседними ячейками и, следовательно, закономерности изменения локальных концентраций. Это обеспечивает универсальность модели: один и тот же математический формализм способен имитировать работу как классифицирующего (грохот), так и гомогенизиру-

ющего (смеситель) оборудования, задаваясь лишь конфигурацией граничных условий и спецификой матрицы P .

Для количественного анализа кинетики грохочения предлагается использовать динамический показатель степени извлечения ε , характеризующий изменение массовой доли выхода частиц мелких фракций от времени процесса

$$\varepsilon^{(k+1)} = \sum_{k=0}^{k+1} q^{(k+1)} \quad (7)$$

Данная параметризация кинетики обеспечивает инструмент для эффективного технологического процесса грохочения через анализ зависимости $\varepsilon(t)$ от режимных параметров вибрации и свойств сыпучего материала.

Для количественной оценки качества смешивания использовался статистический критерий, основанный на определении среднеквадратического отклонения фактического распределения концентраций ключевого компонента от теоретически идеального (равномерного) распределения по ячейкам системы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_i - \bar{S}_i)^2}, \quad (8)$$

где S_i – концентрация частиц ключевого компонента в ячейке с номером i , \bar{S}_i – концентрация частиц ключевого компонента в ячейке с номером i при их идеальном распределении по ячейкам цепи.

Данный параметр σ выступает в роли интегрального мероопределятеля степени неоднородности смеси. Его величина прямо пропорциональна отклонению реальной микроструктуры композита от идеального состояния равномерного распределения. Стремление $\sigma \rightarrow 0$ свидетельствует о достижении высокой степени гомогенизации, в то время как большие значения указывают на наличие значительной локальной сегрегации или недостаточную эффективность процесса смешивания. Использование среднеквадратического отклонения позволяет проводить анализ влияния режимных параметров (амплитуды и частоты вибрации) и времени обработки на конечное качество продукта.

Результаты исследования

Были проведены численные эксперименты для обоих процессов. На рис. 2 показан пример численного эксперимента распределения частиц ключевого компонента по ячейкам цепи в различные моменты времени для процессов грохочения и перемешивания при заданных стохастических параметрах: безразмерный коэффициент диффузии $d=0,05$, безразмерная скорость сегрегации $V=0,02$, безразмерная скорость просеивания частиц ключевого компонента через отверстия сита при грохочении $V_f=0,05$. Слой сыпучего материала разбивался на 6 ячеек. В начальный момент времени частицы ключевого компонента находились в первых двух ячейках.

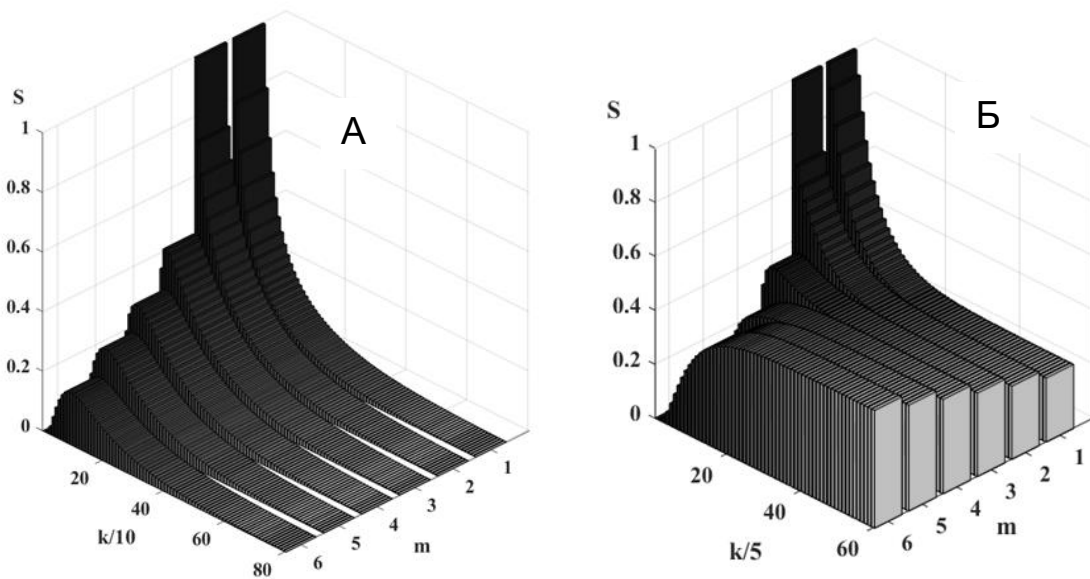


Рис. 2. Распределение частиц ключевого компонента по ячейкам цепи в различные моменты времени при грохочении (А) и перемешивании (Б)

Основным критерием, характеризующим эффективность процесса грохочения, является сепарационная полнота извлечения частиц целевой фракции, количественно описываемая кинетической зависимостью степени обогащения от времени пребывания материала на классифицирующей поверхности [7]. Динамика данного процесса изображена на рис. 3, где представлена полученная кинетическая кривая сепарации, отражающая изменение массовой доли извлеченного ключевого компонента во временном интервале для рассматриваемого численного эксперимента.

Кривая имеет асимптотический характер, что соответствует известному физическому явлению: с течением времени количество частиц проходовых фракций накапливается, а на поверхности сита остается все больше

непроходных частиц, что замедляет процесс просеивания. Чем больше время грохочения, тем выше эффективность процесса. Однако реальное время пребывания материала на грохоте ограничено. Для каждого конкретного случая оно имеет определенное значение и зависит от длины сита, угла его наклона, амплитуды и частоты колебаний. Зная реальное время пребывания сыпучего материала на сите грохота можно определить эффективность промышленного процесса сепарации.

На рис. 4 представлена зависимость степени однородности смеси от времени обработки, описывающая динамику процесса смешивания. Как и ожидалось, с увеличением времени перемешивания значение σ уменьшается, стремясь к минимальному уровню, что свидетельствует о достижении однородности смеси.

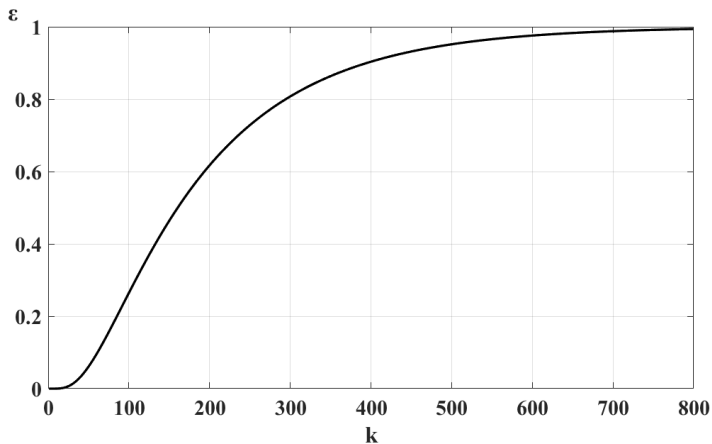


Рис. 3. Кинетика грохочения

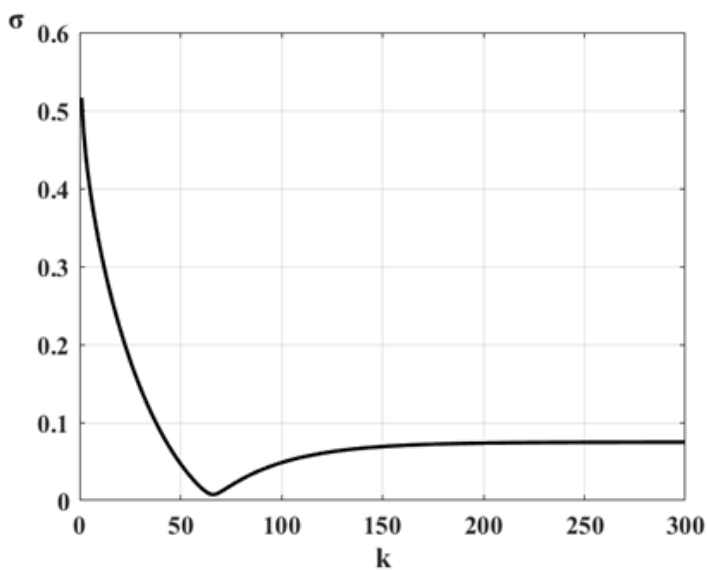


Рис. 4. Кинетика перемешивания

Кривая распределения среднеквадратического отклонения σ от времени является ключевой зависимостью для анализа процесса смешивания. Её вид количественно описывает динамику достижения гомогенности. Кривые $\sigma(t)$, полученные при разных режимах, позволяют объективно сравнивать эффективность различных конструкций смесителей или алгоритмов управления. Кривая $\sigma(t)$ позволяет найти оптимальное время смешивания, соответствующие σ_{min} .

Важно отметить, что точность определения стохастических коэффициентов универсальной модели может быть повышена за счет совместного расчетно-экспериментального исследования процессов грохочения и перемешивания, проводимых с одной и той же смесью при одинаковых параметрах вибровоздействия аппаратов на сыпучую среду на лабораторных установках периодического действия.

Список литературы

1. Мизонов В. Е., Berthiaux Н. Применение теории цепей Маркова в химической инженерии // Международный Косыгинский форум. МНТС Плановский-2021. Пленарная сессия. 2021. С. 65–69. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-65-69. URL: <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-p-65-69>.
2. Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдооживленного слоя частиц антрацита / А. В. Митрофанов, В. Е. Мизонов, А. Н. Беляков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 6. С. 68–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.
3. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / A. Mitrofanov, V. Mizonov, A. Camelo [et al.]. Particulate Science and Technology, 2019, vol. 37, issue 8, pp. 1028–1033. DOI: 10.17654/HM01802026.
4. Jayanta Chakraborty, Doraiswami Ramkrishna. Identification of Markov Matrices of Milling Models. Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, pp. 9763–9771.
5. Исследование эффективности процесса грохочения на вибрационном грохоте с составной конструкцией шпальтового сита / С. И. Ханин, М. А. Малахов, О. С. Мордовская [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140>.
6. Анализ параметров модели смешения полимерных компонентов в пересекающихся потоках / А. Б. Капранова, Д. В. Стенько,

Выводы

Разработана универсальная стохастическая модель, основанная на теории цепей Маркова, которая впервые применяется для описания как процесса виброгрохочения, так и виброперемешивания на единой математической основе. Предложена концепция ячеечного подхода, где различия между процессами объясняются исключительно граничными условиями: открытая система (с сепарацией) для грохота и замкнутая система для смесителя. Проведены численные эксперименты, результаты которых подтвердили адекватность предложенной модели. Полученные зависимости (асимптотический рост извлечения и снижение неоднородности) качественно совпадают с известными закономерностями реальных процессов.

Д. Д. Бахаева [и др.] // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 7. С. 39–46. DOI: 10.1007/s10556-018-0477-0.

7. К расчету процесса вибросепарации на ситовых тканях сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций / В. А. Огурцов, Ю. В. Хохлова, А. П. Алешина [и др.] // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4. С. 257–261. DOI 10.47367/0021-3497_2023_4_257.

8. Ячеечная модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей / В. А. Огурцов, Ю. В. Хохлова, Е. Р. Брик [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», 2021. № 1 (17). С. 62–69.

References

1. Mizonov V. E., Berthiaux H. Primenenie teorii cepei Markova v himicheskoi injenerii [Application of Markov chain theory in chemical engineering]. *Mejdunarodnii Kosiginskii forum. MNTS Planovskii_2021. Plenarnaya sessiya*, 2021. Pp. 65–69. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-65-69. URL: <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-p-65-69>.
2. Razrabotka veroyatnostno_statisticheskoi modeli rasshireniya i aksialnoi strukturi psevdoojivennogo sloya chastic antracita [Development of a probabilistic and statistical model of the expansion and axial structure of a fluidized bed of anthracite particles] / A. V. Mitrofanov, V. E. Mizonov, A. N. Belyakov [et al.]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, issue 6, pp. 68–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.

3. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / A. Mitrofanov, V. Mizonov, A. Camelo [et al.]. *Particulate Science and Technology*, 2019, vol. 37, issue 8, pp. 1028–1033. DOI: 10.17654/HM01802026.

4. Jayanta Chakraborty, Doraiswami Ramkrishna. Identification of Markov Matrices of Milling Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, pp. 9763–9771.

5. Issledovanie effektivnosti processa grohocheniya na vibracionnom grohote s sostavnoi konstrukciei shpaltovogo sita [Investigation of the efficiency of the screening process on a vibrating screen with a composite structure of a trellis screen] / S. I. Hanin, M. A. Malahov, O. S. Mordovskaya [et al.]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*, 2024, issue 9, pp. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140>.

6. Analiz parametrov modeli smesheniya polimernih komponentov v peresekayuschih potokah [Analysis of parameters of the mixing

model of polymer components in intersecting streams] / A. B. Kapranova, D. V. Stenko, D. D. Bahaeva [et al.]. *Matematicheskie metody v tekhnologii i tekhnike*, 2023, issue 7, pp. 39–46. DOI: 10.1007/s10556-018-0477-0.

7. K raschetu processa vibroseparacii na sitovih tkanyah sipuchih materialov s visokim sodержaniem chastic melkih frakcii [To calculate the vibration separation process on sieve fabrics of bulk materials with a high content of fine particles] / V. A. Ogurcov, Yu. V. Hohlova, A. P. Aleshina [et al.]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstilnoi promishlennosti*, 2023, issue 4, pp. 257–261. DOI: 10.47367/0021_3497_2023_4_257.

8. Yachechnaya model smeshvaniya v tekhnologii proizvodstva suhih stroitelnih smesei [The cellular mixing model in the technology of production of dry building mixes] / V. A. Ogurcov, Yu. V. Hohlova, E. R. Brik [et al.]. *Vestnik Povoljskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materiali. Konstrukcii. Tehnologii»*, 2021, vol. 1 (17), pp. 62–69.

Огурцов Валерий Альбертович

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, профессор

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Ogurtsov Valery Albertovich

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Шенберева Александра Вячеславовна

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

аспирант

E-mail: sshenbereva@gmail.com

Shenbereva Alexandra Vyacheslavovna

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Postgraduate Student

E-mail: sshenbereva@gmail.com

Хохлова Юлия Владимировна

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: hohjul@mail.ru

Khokhlova Yulia Vladimirovna

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: hohjul@mail.ru

Огурцов Всеволод Антонович

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

магистрант

E-mail: willdday@yandex.ru

Ogurtsov Vsevolod Antonovich

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

Master's student

E-mail: willdday@yandex.ru

Парамонов Антон Дмитриевич

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

аспирант

E-mail: 9109800120@mail.ru

Paramonov Anton Dmitrievich

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

postgraduate student

E-mail: 9109800120@mail.r

Касьяненко Наталья Сергеевна

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: kasianenko@gmail.com

Kasyanenko Natalia Sergeevna

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: kasianenko@gmail.com

УДК 691.58:536.24:519.6

DOI 10.48612/ntp/4emk-et3e-nnp

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В АРБОЛИТОВЫХ БЛОКАХ ПРИ СУШКЕ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ МАССООБМЕНА

**С. В. ФЕДОСОВ^{1,4}, В. Е. РУМЯНЦЕВА^{2,3}, И. В. КРАСИЛЬНИКОВ^{2,3},
М. А. КОРИНЧУК³, И. А. КРАСИЛЬНИКОВА⁵**

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, г. Москва

² Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

³ Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

⁴ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва

⁵ Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Российская Федерация, г. Владимир

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru; varrym@gmail.com, korasb@mail.ru,
m1na47-74@mail.ru, irinanebukina@rambler.ru

В статье рассматривается проблема оптимизации процессов сушки арболита – экологически ориентированного композитного материала на основе древесного заполнителя и цементного вяжущего. Недостаточная изученность физико-химических процессов твердения и нестационарного массопереноса приводит к образованию усадочных дефектов и снижению прочностных характеристик изделий. Целью работы является разработка математической модели, описывающей распределение влажностного содержания в блоке-сырце при различных граничных условиях. В основу исследования положено нелинейное дифференциальное уравнение А. В. Лыкова для капиллярно-пористых тел. Получено аналитическое решение задачи с использованием безразмерных критериев подобия (Фурье, Кирпичева) для трех технологических схем размещения блоков: на проницаемом, непроницаемом и частично проницаемом основании. Проведен численный эксперимент, демонстрирующий пространственно-временную эволюцию влажностного поля. Результаты показывают, что схема с непроницаемым основанием вызывает асимметрию профиля влажности и риск трещинообразования, тогда как частично проницаемый настил обеспечивает оптимальный баланс между скоростью сушки и качеством структуры. Разработанная модель позволяет прогнозировать дефекты и может служить основой для создания цифрового двойника технологического процесса.

Ключевые слова: арболит, сушка, математическое моделирование, массоперенос, влажностное содержание, граничные условия, технологические схемы, критерии подобия.

MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY MOISTURE TRANSFER IN ARBOLITE BLOCKS DURING DRYING, TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR ORGANIZING MASS EXCHANGE

**S. V. FEDOSOV^{1,4}, V. E. RUMYANTSEVA^{2,3}, I. V. KRASILNIKOV^{2,3},
M. A. KORINCHUK³, I. A. KRASILNIKOVA⁵**

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
Russian Federation, Moscow

² Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

³ Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

⁴Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN
Russian Federation, Moscow

⁵ Vladimir State University
Russian Federation, Vladimir

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru; varrym@gmail.com, korasb@mail.ru,
m1na47-74@mail.ru, irinanebukina@rambler.ru

The article discusses the problem of optimizing the drying processes of arbolite, an environmentally friendly composite material based on wood filler and cement binder. Insufficient knowledge of the physical and chemical processes of hardening and non-stationary mass transfer leads to the formation of shrinkage defects and a decrease in the strength characteristics of the products. The aim of the work is to develop a mathematical model that describes the distribution of moisture content in a raw block under various boundary conditions. The study is based on the nonlinear differential equation of A.V. Lykov for capillary-porous bodies. An analytical solution of the problem is obtained using dimensionless similarity criteria (Fourier, Kirpichev) for three technological schemes of block placement: on a permeable, impermeable, and partially permeable base. A numerical experiment is conducted to demonstrate the spatial and temporal evolution of the moisture field. The results show that the scheme with an impermeable base causes asymmetry in the moisture profile and increases the risk of cracking, while the partially permeable base provides an optimal balance between the drying rate and the quality of the structure. The developed model allows for the prediction of defects and can serve as a basis for creating a digital twin of the technological process.

Keywords: arbolite, drying, mathematical modeling, mass transfer, moisture content, boundary conditions, technological schemes, and similarity criteria.

Введение

В условиях перехода к устойчивому развитию и «зелёным» технологиям арболит приобретает значимость как экологически ориентированный материал. Ключевое преимущество лёгких бетонов на органических заполнителях – эффективное использование вторичных ресурсов (отходов деревообработки, сельского хозяйства), составляющих до 80–90 % объёма композита. Это снижает антропогенную нагрузку и соответствует принципам циркулярной экономики.

Арболит представляет собой композиционный материал на основе цементного вяжущего и древесной дробленки. Его низкая теплопроводность (0,07...0,17 Вт/м·К) и достаточная прочность (1,5...3,5 МПа) делают его перспективным для энергоэффективного строительства. Для нейтрализации ингибирующего воздействия экстрактивных веществ древесины на гидратацию цемента применяются химические минерализаторы (сульфат алюминия, хлорид кальция, жидкое стекло) и функциональные добавки.

Однако внедрению материала препятствует недостаточная изученность физико-химических процессов твердения и сушки. Арболит – сложная многофазная капиллярно-пористая система с выраженной анизотропией свойств. В процессе сушки одновременно протекают гидратация цемента, испарение влаги, капиллярный перенос и усадочные деформации. Неравномерное распределение темпера-

туры и влажности вызывает внутренние напряжения и микротрещины, снижая прочностные характеристики.

Для ускорения твердения применяются методы тепловой обработки: электропрогрев, СВЧ-нагрев или традиционная тепловлажностная обработка (ТВО). Несмотря на наличие разработок, отсутствует комплексная теоретическая модель, описывающая нестационарные процессы тепломассопереноса с учётом фазовых превращений и химических реакций. Теоретическое и экспериментальное исследование этих закономерностей позволит назначать рациональные режимы сушки, минимизировать образование дефектов и повысить энергоэффективность производства.

Цель публикации: Разработка теоретической базы и аналитического аппарата для рационального проектирования режимов сушки арболитовых изделий, минимизации производственных дефектов (трещин, коробления) и повышения энергоэффективности производства на основе прогнозирования полей влагосодержания.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положена концепция арболита как многофазной капиллярно-пористой среды (твёрдая фаза – цемент и заполнитель, жидкая – влага, газовая – воздух в порах). Структурные особенности определяют диффузионные свойства и анизотропию: тепло-

и влагопроводность вдоль волокон превышают поперечные значения в 1,5...2,5 раза.

Технологические схемы сушки блоков-сырца классифицированы по типу опорной поверхности и организации массообмена:

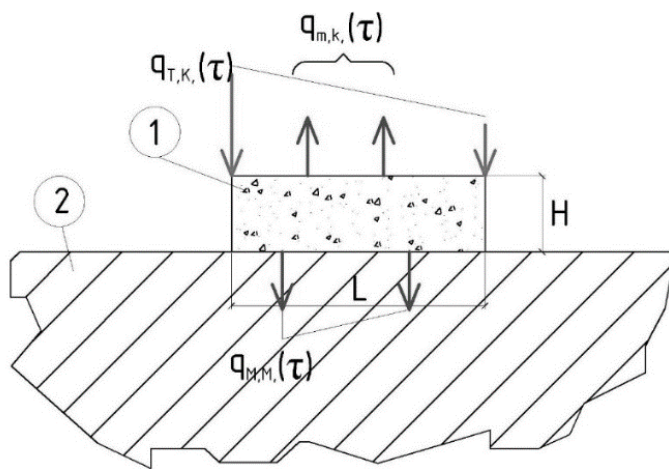
1. **Проницаемое основание.** Характеризуется двусторонним отводом влаги (испарение с верхней поверхности и диффузия в подстилающий слой). Применяется преимущественно для естественной сушки в жарком климате (рис. 1).

2. **Непроницаемое основание.** Предполагает односторонний массообмен через верхнюю и боковые грани. Условие нулевого потока влаги снизу приводит к асимметричному профилю влагосодержания и риску усадочных дефектов в придонной зоне (рис. 2).

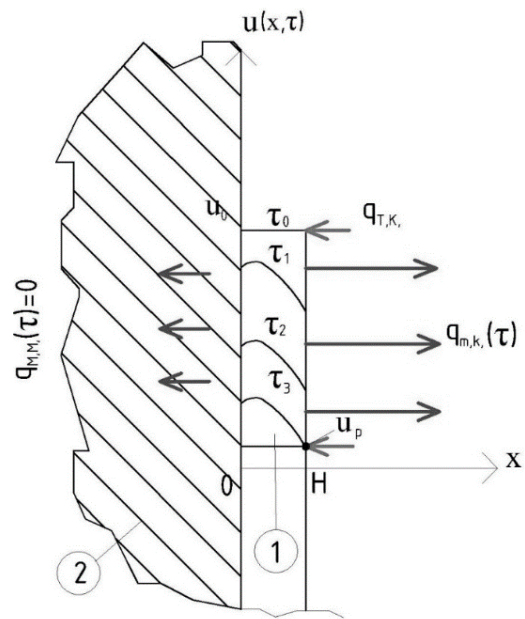
3. **Частично проницаемое основание.** Промежуточный вариант (контакт с перфорированными формами), где массообмен снизу описывается граничным условием третьего рода с пониженным коэффициентом отдачи (рис. 3).



а)



б)



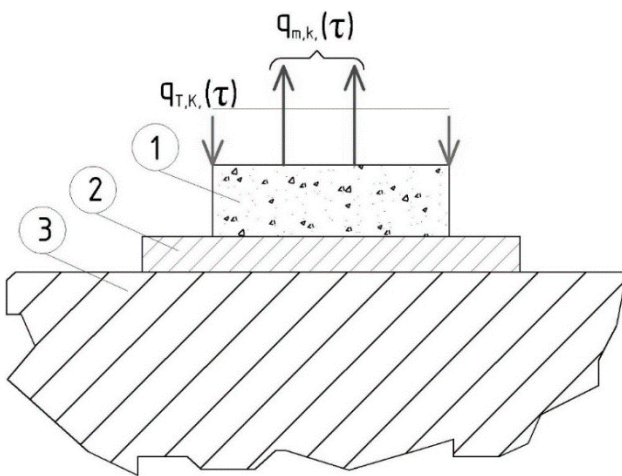
в)

Рис. 1. Вариант размещения с контактом вида «блок – сплошной проницаемый настил»
а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена; в) расчетная схема влагопереноса.

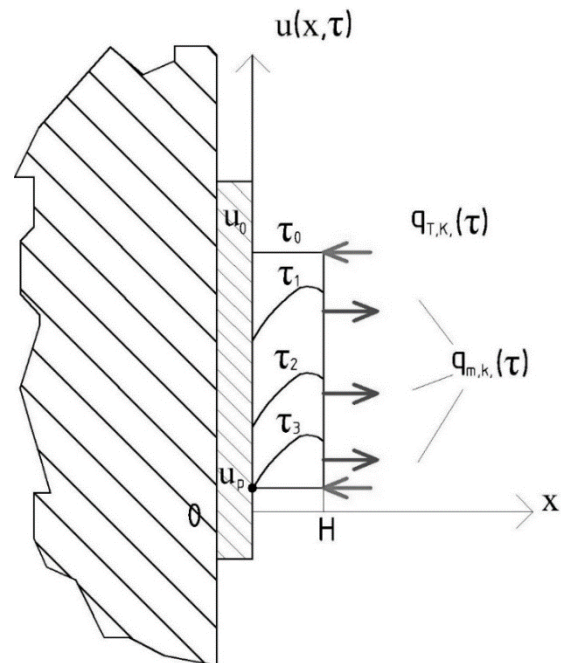
1 – блок-сырец; 2 – настил; u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья



а)



б)



в)

Рис. 2. Вариант размещения с контактом вида «сырец – сплошной непроницаемый настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена; в) расчетная схема влагопереноса.
 1 – блок-сырец; 2 – настил; 3 – основание
 u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Во всех схемах структурообразование сопровождается тепловой обработкой двумя способами:

- **Естественная сушка.** Теплоподвод осуществляется комбинированным механизмом: конвекция с воздухом и поглощение солнечной радиации. Интенсивность зависит от метеорологических параметров.

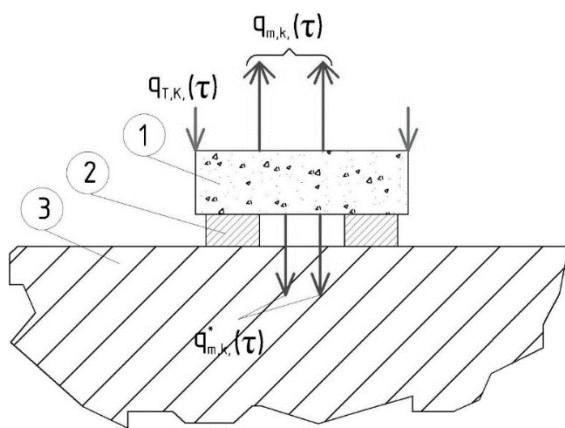
- **Искусственная сушка.** Блоки размещаются в сушильных камерах, где теплоноситель нагревается до 40–60 °С и подаётся принудительно. Это позволяет стабилизировать

параметры среды и исключить влияние климатических факторов.

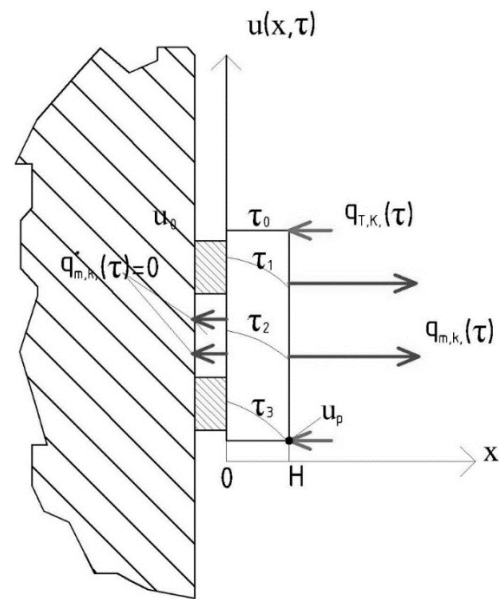
Физическая картина распределения потоков теплоты и влаги варьируется в зависимости от схемы. Для проницаемого основания характерен двунаправленный градиент влагосодержания, для непроницаемого – ориентированный исключительно вверх. Выбор схемы влияет на кинетику сушки и формирование микроструктуры цементного камня: схема с проницаемым основанием технологически проще, но её эффективность ограничена климатическими условиями и требуемыми площадями.



а)



б)



в)

Рис. 3. Вариант размещения с контактом вида «сырец – несплошной настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена;
 в) расчетная схема влагопереноса. 1 – блок-сырец; 2 – настил; 3 – основание
 u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Математическое моделирование процессов сушки базируется на нелинейном дифференциальном уравнении А. В. Лыкова для нестационарного массопереноса в капиллярно-пористых телах [17]:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[k(x, \tau) \text{grad } u(x, \tau)], \quad (1)$$

где $u(x, \tau)$ – изменение влажности по толщине блока и во времени, кг влаги/кг сухого; $k(x, \tau)$ – коэффициент массопроводности (коэффициент диффузии влаги в твёрдом теле), $\text{м}^2/\text{с}$.

В процессе сушки арболита коэффициент массопроводности представляет собой ключевой параметр, определяющий интенсивность

внутреннего влагопереноса под действием градиента влагосодержания. Физически он характеризует способность капиллярно-пористой структуры материала пропускать влагу и зависит от множества факторов: текущей влажности (снижается по мере высыхания из-за уменьшения количества свободной воды в капиллярах), температуры (возрастает с повышением температуры за счёт увеличения подвижности молекул воды), степени гидратации цементного камня (формирование гелевых фаз сужает поровое пространство) и анизотропии древесного наполнителя (диффузия вдоль волокон превышает поперечную в 1,5–2,5 раза) [10, 13]. Экспериментальные исследования показывают, что для арболита с плотностью 500 ... 700 $\text{кг}/\text{м}^3$

коэффициент массопроводности варьируется в диапазоне $1,5 \cdot 10^{-10} \dots 8,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с при изменении влажности от начальной (60–70 %) до равновесной (12–16 %) [13]. В рамках предлагаемой математической модели для обеспечения вычислительной устойчивости, с учетом применения метода микропроцессов, коэффициент массопроводности принимается постоянным (равным его среднему значению за рассматриваемый временной интервал) [18]. Такой подход позволяет сохранить физическую адекватность модели при одновременном снижении вычислительной сложности, поскольку локальная погрешность аппроксимации не превышает 3 %, а глобальная погрешность интегрального распределения влаги по толщине блока за весь цикл сушки укладывается в допустимые пределы ± 5 %.

При описанных выше допущениях, дифференциальное уравнение нестационарной массопроводности (диффузии влаги) по толщине блока-сырца принимает линейный вид:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq H. \quad (2)$$

Начальное распределение влажности по толщине блока-сырца на i -м микропроцессе принимаем неравномерным, полученное из результатов расчета $(i-1)$ -го микропроцесса, описываемое какой-либо математической функцией:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x). \quad (3)$$

В частном случае равномерного начального условия, оно запишется:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0. \quad (4)$$

Правильные граничные условия обеспечивают физическую достоверность и математическую корректность решения дифференциального уравнения, определяя единственность решения и адекватно отражая взаимодействие

моделируемой системы с внешней средой на границах расчётной области.

На внешней поверхности блока граничное условие характеризует плотность потока влаги, поступающей из внутренних слоев блока к границе раздела фаз:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=H} = q_{m,k}(\tau). \quad (5)$$

На нижней поверхности блока поток влаги, подходящей из внутренних слоев блока к нижней поверхности, должен быть равен потоку влаги, идущему в основание по механизму фильтрационного переноса:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{m,\phi}(\tau). \quad (6)$$

Предложенный подход позволяет не только прогнозировать температурно-влажностные поля в объеме блока на любом этапе сушки, но и оценивать риски образования дефектов (трещин, коробления) за счёт расчёта градиентов усадочных деформаций и внутренних напряжений, что создаёт предпосылки для разработки цифрового двойника технологического процесса производства арболитовых изделий.

Результаты и обсуждение

Анализ научной литературы показал, что профессорами С. П. Рудобаштой и Э. М. Карташовым [19] получено аналитическое решение дифференциального уравнения нестационарной массопроводности для неограниченной пластины при неравномерном начальном распределении концентраций переносимого компонента и граничных условиях второго рода на обеих поверхностях, которые представлены в виде функции, зависящей от времени. Данное решение может быть адаптировано к задаче моделирования влагопереноса в среде с переменными потенциалами в арболитовом блоке-сырце на i -м микропроцессе (уравнения (2)–(6)):

$$\begin{aligned} u(x, \tau) = & \frac{1}{H} \int_0^H u_0(x) dx - \frac{1}{H} \int_0^T [q_{mk}(\tau^*) - q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^* + \\ & + \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^H u_0\left(\frac{x^*}{H}\right) \cos\left(\pi m \frac{x^*}{H}\right) d\frac{x^*}{H} - \\ & - \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^T [q_{mk}(\tau^*) - (-1)^m q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^*. \end{aligned} \quad (7)$$

Как отмечено в исследованиях [17-20], применение безразмерных переменных и критерияльного анализа при математическом моделировании процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах обеспечивает универсальность решений и позволяет выявить

физическую сущность явлений независимо от конкретных геометрических размеров и свойств материала. Введём следующие безразмерные переменные и критерии подобия Фурье и Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_p}{u_p}, \quad \bar{x} = \frac{x}{H}, \quad U_0(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u_0(x, \tau) - u_p}{u_p}, \quad (8)$$

$$Fo_m = \frac{k\tau}{H^2}, \quad Ki_{mk}(Fo_m^*) = \frac{q_{mk}(\tau^*) H}{k u_p}, \quad Ki_{m\phi}(Fo_m^*) = \frac{q_{m\phi}(\tau^*) H}{k u_p}. \quad (9)$$

После подстановки (8) и (9) в решение (7), получено следующее аналитическое решение для расчета полей влагосодержаний в

блоке арболита-сырца, учитывающее изменение во времени плотности потоков массы:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \int_0^1 U_0(\bar{x}) d\bar{x} - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*). \quad (10)$$

Полученное аналитическое решение представляет собой распределение влагосодержания $u(x, \tau)$ по толщине арболитового блока при его сушке, с учетом изменения во времени потоков массы. Оно является решением линейного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности (2) при неравномерном начальном распределении влаги (3) и граничных условиях второго рода (4)–(5), соответствующих конкретной технологической схеме сушки (проницаемый или частично проницаемый настил). При моделировании сушки на непроницаемом настиле $Ki_{m\phi} = 0$. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объеме арболитового блока-сырца с учётом градиента влагосодержания на

поверхностях, обусловленного испарением свободной воды. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные частные случаи, необходимые для моделирования технологического процесса сушки.

I. Равномерное начальное распределение концентраций, в виде:

$$U_0(\bar{x}) = \frac{u_0(x, 0) - u_p}{u_p} \Big|_{\tau=0} = U_0 = \frac{u_0 - u_p}{u_p}. \quad (11)$$

В таком случае динамика влажности по толщине блока будет изменяться по следующему закону:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*). \quad (12)$$

II. Линейная зависимость критериев Кирпичева во времени процесса в виде:

$$Ki_{mk}(Fo_m) = A_{mk} Fo_m + B_{mk}; \quad Ki_{m\phi}(Fo_m) = A_{m\phi} Fo_m + B_{m\phi}. \quad (13)$$

Подставив предлагаемые зависимости массообменного критерия Кирпичева на поверхностях блока (13) от числа Фурье в

решение при равномерном начальном распределении влагосодержаний (12), после математических преобразований получаем:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - \left\{ \frac{A_{mk} - A_{mf}}{2} Fo_m^2 + (B_{mk} - B_{mf}) Fo_m \right\} - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \left\{ \frac{1}{2} [A_{mk} - (-1)^m A_{mf}] Fo_m^2 + [B_{mk} - (-1)^m B_{mf}] Fo_m \right\}. \quad (14)$$

III. Равномерное начальное распределение концентраций и постоянные значения критериев Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - (K_{imk} - K_{imf}) Fo_m - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) [K_{imk} - (-1)^m K_{imf}] Fo_m. \quad (15)$$

Полученное аналитическое решение представляет собой распределение влагосодержания $u(x, t)$ по толщине арболитового блока, которое можно использовать при соответствующих конкретных технологических схемах сушки на проницаемом, непроницаемом или частично проницаемом настиле. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объёме арболитового блока-сырца с учётом градиента влагосодержания на поверхности.

В качестве иллюстрации возможностей разработанной расчётной методики приведены результаты численного эксперимента по моделированию нестационарного влагопереноса в арболитовом блоке при различных схемах организации массообмена на границах. В расчетах принята начальная влажность арболита 60%, а равновесным будем считать значение влажности 20%, следовательно, $U_0 = 2$.

На рис. 4 представлено распределение безразмерного влагосодержания U по толщине блока при двустороннем массообмене с окружающей средой ($K_{imk}=1, K_{imf}=1$), что соответствует технологической схеме сушки на проницаемом настиле либо в условиях принудительной конвективной сушки с обдувом обеих поверхностей. В этом случае наблюдается симметричное снижение влажности от центра к границам с формированием характерного «параболического» профиля. Хотя в действительности реальных технологических процессов сушки арболита равенство потоков массы достигаться будет редко, полученные графические зависимости показывают воспроизводимость полученного решения и демонстрируют постепенное приближение распределения влагосодержания к равновесному. Такая схема обеспечивает

наиболее интенсивное влагоудаление, однако требует значительных энергозатрат на поддержание интенсивного массообмена на обеих поверхностях.

Сушка арболита на непроницаемом основании (рис. 5), характерная для технологий с размещением блоков на металлических поддонах без перфорации ($K_{imk}=1, K_{imf}=0$), демонстрирует принципиально иную картину распределения влаги. Отсутствие массоотдачи с нижней поверхности приводит к формированию асимметричного профиля с максимумом влажности в придонной зоне. За тот же безразмерный временной интервал влагосодержание снизилось лишь на 28 % от начального избытка. Повышенные градиенты влажности в поверхностных слоях создают предпосылки для возникновения усадочных напряжений и микротрещин [23-31], особенно в зоне контакта «цементный камень – древесное волокно». При этом в придонной зоне сохраняется избыточная влага, что замедляет достижение распалубочной прочности.

На рис. 6 показан промежуточный вариант – сушка при асимметричных условиях массообмена ($K_{imk}=1, K_{imf}=0,5$), реализуемый при использовании частично проницаемых перфорированных форм или решётчатых настилов. Асимметрия профиля влажности менее выражена, чем в случае непроницаемого основания, что снижает риски образования дефектов структуры.

Полученные результаты подтверждают физическую адекватность предложенной математической модели и демонстрируют её прикладную ценность для рационального проектирования режимов сушки арболитовых изделий. Выбор технологической схемы должен осуществляться с учётом баланса между произво-

дительностью (временем достижения расплывчатой прочности) и качеством продукции (равномерностью структуры, отсутствием дефектов). Для условий массового производства в умеренном климате предпочтительной представляется схема с частично проницаемым основанием, обеспечивающая снижение времени сушки на 25–30 % по сравнению с непроницаемым вариантом при сохранении приемлемой равномерности влажностного поля.

Следует отметить, что в реальных условиях потоки массы на поверхности не остаются

постоянными, а изменяются во времени вследствие снижения градиента влажности на границе и изменения скорости воздушного потока. Применение метода микропроцессов, заложенного в основу расчёта, позволяет адекватно учитывать эту нестационарность за счёт адаптивного обновления численного значения граничных условий на каждом временном шаге, что обеспечивает погрешность аппроксимации не более 3–5 % по сравнению с экспериментальными кинетическими кривыми сушки.

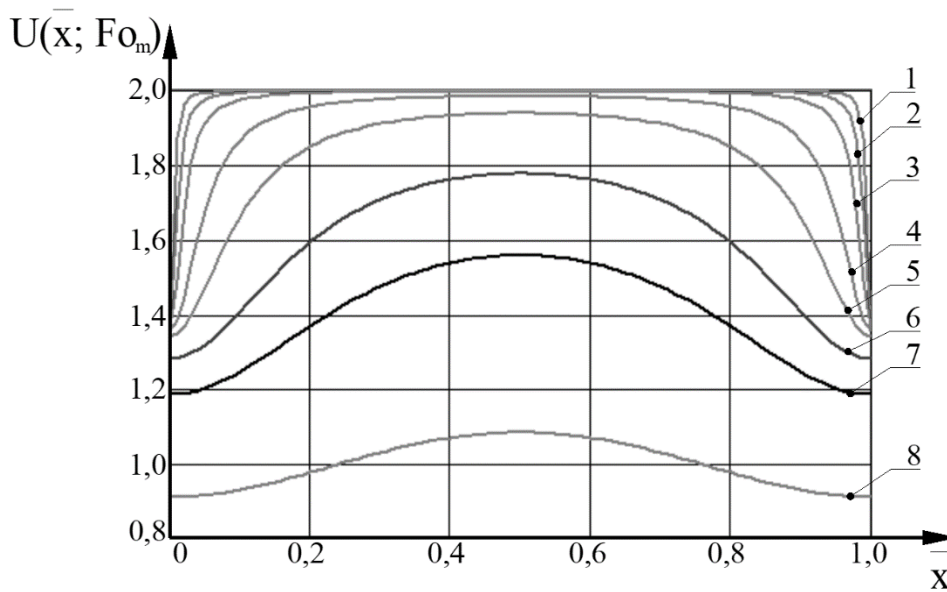


Рис. 4. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2, K_{imk}=1, K_{imф}=1$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

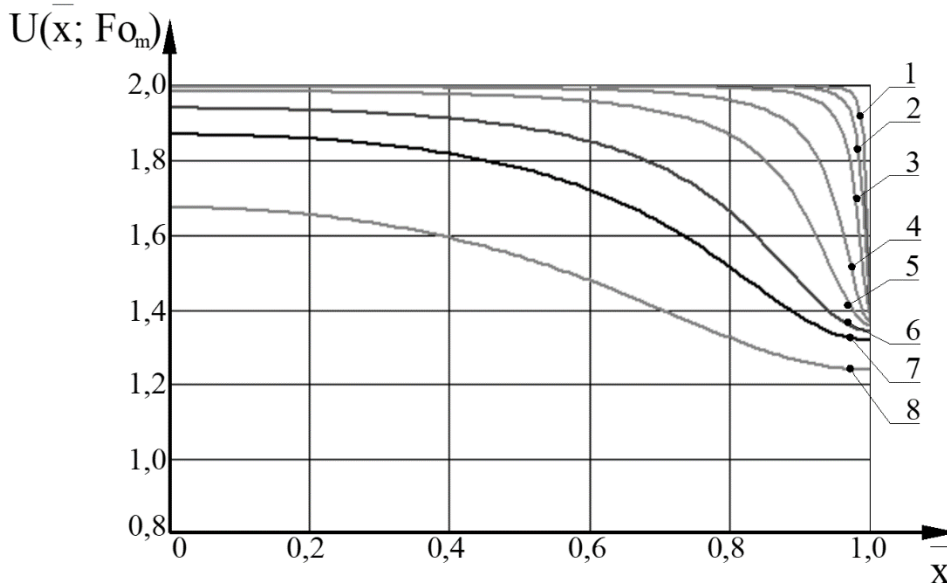


Рис. 5. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2, K_{imk}=1, K_{imф}=0$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

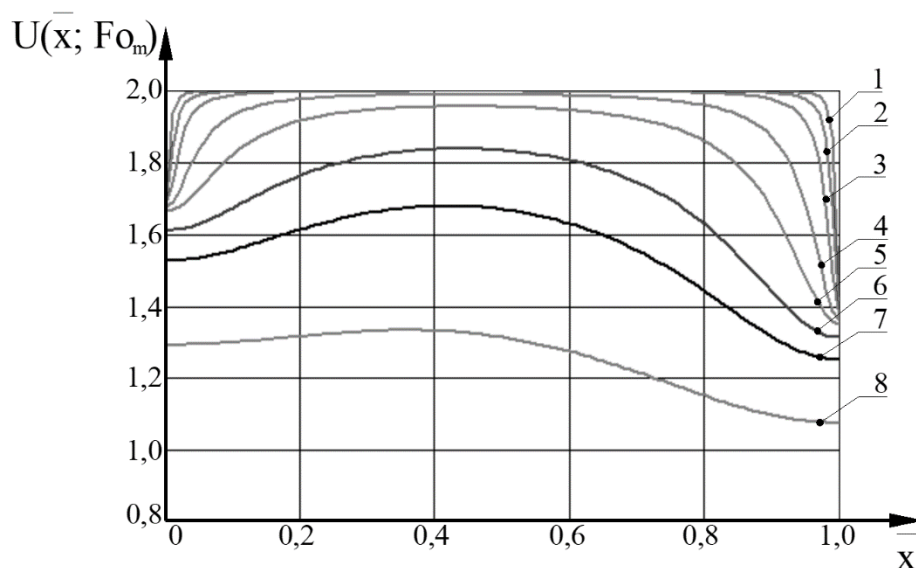


Рис. 6. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $K_{\text{имк}}=1$, $K_{\text{имф}}=0,5$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

Выводы

1. Разработана математическая модель нестационарного влагопереноса в арболите на основе уравнения диффузии А. В. Лыкова, учитывающая анизотропию материала и химические процессы гидратации через усредненный коэффициент массопроводности.

2. Получено аналитическое решение для распределения влагосодержания по толщине блока при переменных во времени граничных условиях второго рода, адаптированное для метода микропроцессов.

3. Установлено, что сушка на непроницаемом основании приводит к значительной асимметрии влажностного поля и накоплению влаги в придонной зоне, что повышает риск усадочных деформаций.

4. Схема с частично проницаемым основанием признана оптимальной для массового производства, обеспечивая снижение времени сушки на 25–30 % по сравнению с непроницаемым вариантом при сохранении равномерности структуры.

Список литературы

1. Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Ленинград: Стройиздат, 1990. 415 с.

2. Maximizing Strength and Durability in Wood Concrete (Arbolite) via Innovative Additive Control and Consumption / A. Yagubkin, D. Shabanov, A. Niyakovskii [et al.]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, vol. 15, issue 9, pp. 13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>

3. Ilmaliyev Zh., Zhatkanbayev Ye. Ye., Kurtibay K. A. Research and development of wood-cement composites as sustainable building materials based on secondary resources // Комплексное использование минерального сырья. 2025. № 4 (335). С. 34–41. EDN: SKNBHS. <http://doi.org/10.31643/2025/6445.37>

4. Федосов С. В., Кеневей Э., Лапидус А. А. В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в республике Чад // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 72–80. EDN: JQQWLD.

<http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78>

5. Долматов С. Н. Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 29–46. EDN: UYZBPR. <http://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>

6. Исакулов Б. Р., Акулова М. В., Нургалеев Р. М. Формирование структуры шлакощелочного арболита в процессе дальнейшего твердения // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 24–29. EDN: WAALAY. http://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_24

7. Создание и изготовление композитов на основе отходов древесины / Ж. Ильмалиев, Қ. Куртибай, Ә. Қаппасұлы [и др.] // Вестник КазУТБ. 2025. Т. 2. № 27. EDN: HWMVCO. <http://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-704>

8. Кульшаров Б. Б. Влияние влажности на прочностные характеристики блоков из легкого бетона на основе кукурузных отходов для строительства текстильных предприятий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 122–126. EDN: OHBYZQ. http://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_3_122
9. Показатели технологии изготовления изделий из арболита с применением электро-тепловой обработки / С. В. Федосов, А. А. Лапидус, А. М. Соколов [и др.] // Строительные материалы. 2023. № 3. С. 4–11. EDN: IMEBXQ. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10>
10. Процессы структурообразования шлакощелочного арболита в условиях тепловлажностной и тепловой обработки / К. Е. Иманалиев, Ж. Н. Назыбек, Ж. П. Атамбаева [и др.] // Точная наука. 2021. № 102. С. 21–25. EDN: ТОНVEQ
11. Яковенко С. М., Данько В. П. Арболит, пенобетон и газобетон: технические характеристики в сравнительном анализе // Components of Scientific and Technological Progress. 2024. № 12 (102). С. 15–19. EDN: PKBHST
12. Влияние дисперсности древесины в строительных материалах на ее скорость термодеструкции / М. Д. Болотов, Е. А. Коваленко, Д. О. Плеханов [и др.] // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 3 (19). С. 30–35. EDN: ZDGBZD. <http://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.60.33.005>
13. Закономерности физико-химических явлений теплопереноса, структурообразования и учета эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, М. А. Коринчук [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 3 (56). С. 70–80. EDN: KGSHPH
14. Increase of physical and mechanical parameters of arbolite-concrete composites by deep impregnation with liquid sulfur / B. R. Isakulov, F. T. Balmaganbetova, A. R. Sundetova [et al.]. Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2025. № 2 (151). С. 59–76. EDN: WTOBQE. <http://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-59-76>
15. Сафина А. В., Хаертдинова А. А. Исследование эксплуатационных свойств древесно-цементных композитов на основе древесных отходов экстракционного производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5 (155). EDN: JSOIRE. <http://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.54>
16. Оптимизация состава светопроницаемого арболита на древесном наполнителе / С. Е. Ткаченко, О. Е. Смирнова, В. Ф. Хританков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 3 (795). С. 32–40. EDN: OHSBGQ. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-795-3-32-40>
17. Лыков А. В. Теплообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
18. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории теплопереноса / С. В. Федосов, И. В. Красильников, В. Е. Румянцева [и др.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 4. С. 392–409. EDN: WNUWLC. <http://doi.org/10.22363/1815-52352023-19-4-392-409>
19. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Химическая технология: диффузионные процессы. Часть 2. М: Юрайт. 2018. 296 с.
20. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон - жидкая среда», лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 134–140. EDN: SIGNGF. <http://doi.org/10.31659/0585-430x-2022-799-1-2-134-140>
21. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Roumyantseva, I. Krasilnikov [et al.]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, vol. 403 LNNS, pp. 1362–1370. EDN: TPZZSD. http://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_152
22. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. Chem-ChemTech, 2022, vol. 65. issue 7, pp. 61–70. EDN: WBKUAS. <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6606>
23. Прогнозирование долговечности железобетонной башенной градирни, с учетом циклически изменяющихся параметров среды эксплуатации / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 89–98. EDN: LYUCXY
24. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 1 (42). С. 24–31. EDN: UKZZCT
25. Определение влияния вязкости насыщающей жидкости на физико-механические характеристики цементного камня различной пористости / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] //

Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (43). С. 143-152. EDN: XYRZIF

26. Трансформация прочности бетона при эксплуатации конструкции в агрессивной воздушной среде с изменяющимися параметрами / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, У. А. Новикова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 158–168. EDN: UPRSBB

27. Моделирование массопереноса агрессивных растворов солей в торкрет-бетонном покрытии / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, У. А. Новикова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 116–128. EDN: ARLVBF

28. Самовосстановление бетонов модифицированием специальными бактериями / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, М. В. Таничев [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 160–167. EDN: YJJDBE

29. Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко [и др.] // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 65–70. EDN: QZJSCJ

30. Гетерогенные физико-химические процессы массопереноса агрессивных веществ в структуре бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовой среде с изменяющимися параметрами / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 142–152. EDN: VEQJNB

31. Румянцева В. Е., Красильников И. В., Красильникова И. А. Оценка эффективности некоторых составов бетонных смесей, применяемых при торкретировании, по критериям долговечности // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 4 (53). С. 97–108. EDN: CGJWBL

References

1. Nanazashvili I. Kh. *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoy kompozitsii* [Building materials from wood-cement composition]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 415 p. (in Russ.).

2. Maximizing Strength and Durability in Wood Concrete (Arbolite) via Innovative Additive Control and Consumption / A. Yagubkin, D. Shabanov, A. Niyakovskii [et al.]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 15, issue 9, pp. 13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>

3. Ilmaliyev Zh., Zhatkanbayev Ye. Ye., Kurtibay K. A. Research and development of wood

- cement composites as sustainable building materials based on secondary resources // Комплексное использование минерального сырья. 2025. № 4 (335). С. 34–41. EDN: SKNBHS. <http://doi.org/10.31643/2025/6445.37>

4. Fedosov S. V., Kenevei E., Lapidus A. A. V poiske innovatsionnykh materialov dlya massovogo stroitel'stva maloetazhnykh zdaniy v respublike Chad [In search of innovative materials for mass construction of low-rise buildings in the Republic of Chad]. *Stroitel'nye materialy*, 2023, issue 5, pp. 72–80. EDN: JQQWLD. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78> (in Russ.).

5. Dolmatov S. N. Analiz potentsial'noy emkosti rynka i ob'emov potrebleniya stenovykh stroitel'nykh materialov, orientirovannykh na individual'nykh zastroishchikov, primenitel'no k tekhnologii drevesno-mineral'nykh kompozitov [Analysis of potential market capacity and consumption volumes of wall building materials aimed at individual developers, in relation to wood-mineral composites technology]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii*, 2025, vol. 1 (33), pp. 29–46. <http://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29> (in Russ.).

6. Isakulov B. R., Akulova M. V., Nurgaliev R. M. Formirovanie struktury shlakoshchelochnogo arbolita v protsesse dal'neyshego tverdeniya [Formation of the structure of slag-alkali arbolite in the process of further hardening]. *Ekspert: teoriya i praktika*, 2024, vol. 1 (24), pp. 24–29. EDN: WAALAY. http://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_24 (in Russ.).

7. Sozdanie i izgotovlenie kompozitov na osnove otkhodov drevesiny [Creation and production of composites based on wood waste] / Zh. Il'maliev, K. Kurtibay, A. Kappasuly [et al.]. *Vestnik KazUTB*, 2025, vol. 2, issue 27. EDN: HWMVCO. <http://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-704> (in Russ.).

8. Kul'sharov B. B. Vliyanie vlazhnosti na prochnostnye kharakteristiki blokov iz legkogo betona na osnove kukuruznykh otkhodov dlya stroitel'stva tekstil'nykh predpriyatii [Influence of humidity on strength characteristics of lightweight concrete blocks based on corn waste for construction of textile enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2024, vol. 3 (411), pp. 122–126. EDN: OHBYZQ. http://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_3_122 (in Russ.).

9. Pokazateli tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz arbolita s primeneniem elektroteplovoy obrabotki [Indicators of the technology for manufacturing arbolite products using electrothermal treatment] / S. V. Fedosov, A. A. Lapidus, A. M. Sokolov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2023,

issue 3, pp. 4–11. EDN: IMEBXQ. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10> (in Russ.).

10. Protsessy strukturoobrazovaniya shlakoshchelochnogo arbolita v usloviyakh teplov-lazhnostnoy i teplovoy obrabotki [Processes of structure formation of slag-alkali arbolite under conditions of heat-moisture and thermal treatment] / K. E. Imanaliev, Zh. N. Nazybek, Zh. P. Atambaeva [et al.]. *Tochnaya nauka*, 2021, issue 102, pp. 21–25. EDN: TOHVEQ (in Russ.).

11. Yakovenko S. M., Danko V. P. Arbolit, penobeton i gazobeton: tekhnicheskie kharakteristiki v sravnitel'nom analize [Arbolite, foam concrete and aerated concrete: technical characteristics in comparative analysis]. *Components of Scientific and Technological Progress*, 2024, vol. 12 (102), pp. 15–19. EDN: PKBHTS (in Russ.).

12. Vliyanie dispersnosti drevesiny v stroitel'nykh materialakh na ee skorost' termodestruksii [Influence of wood dispersion in building materials on its thermal destruction rate] / M. D. Bolotov, E. A. Kovalenko, D. O. Plekhanov [et al.]. *Aktual'nye problemy bezopasnosti v tekhnosfere*, 2025, vol. 3 (19), pp. 30–35. EDN: ZDGBZD. <http://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.60.33.005> (in Russ.).

13. Zakonomernosti fiziko-khimicheskikh yavleniy teplomassoperenosa, strukturoobrazovaniya i ucheta endo- i ekzotermicheskikh effektov v protsessakh sushki blokov arbolitasyrtca [Regularities of physico-chemical phenomena of heat and mass transfer, structure formation and accounting for endo- and exothermic effects in the drying processes of arbolite green blocks] / V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov, M. A. Korinchuk [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2025, vol. 3 (56), pp. 70–80. EDN: KGSHPH (in Russ.).

14. Increase of physical and mechanical parameters of arbolite-concrete composites by deep impregnation with liquid sulfur / B. R. Isakulov, F. T. Balmaganbetova, A. R. Sundetova [et al.]. *Vestnik Evraziyskogo natsional'nogo universiteta imeni L. N. Gumileva. Seriya: Tekhnicheskie nauki i tekhnologii*, 2025, vol. 2 (151), pp. 59–76. EDN: WTOBQE. <http://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-59-76> (in Russ.).

15. Safina A. V., Khaertdinova A. A. Issledovanie ekspluatatsionnykh svoystv drevesno-tsementnykh kompozitov na osnove drevesnykh otkhodov ekstraktsionnogo proizvodstva [Study of operational properties of wood-cement composites based on wood waste from extraction production]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2025, issue 5 (155). EDN: JSOIRE. <http://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.54> (in Russ.).

16. Optimizatsiya sostava svetopronitsaemogo arbolita na drevesnom zapolnitele [Optimization of the composition of light-permeable arbolite

on wood aggregate] / S. E. Tkachenko, O. E. Smirnova, V. F. Khritankov [et al.]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2025, vol. 3 (795), pp. 32–40. EDN: OHSBGQ. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-795-3-32-40> (in Russ.).

17. Lykov A. V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. (in Russ.).

18. Fizicheskie osobennosti problem zhidkostnoy korrozii zhelezobetona s pozitsiy teorii teplomassoperenosa [Physical features of liquid corrosion problems of reinforced concrete from the standpoint of heat and mass transfer theory] / S. V. Fedosov, I. V. Krasil'nikov, V. E. Rummyantseva [et al.]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*, 2023, vol. 19, issue 4, pp. 392–409. EDN: WNUWLC. <http://doi.org/10.22363/1815-52352023-19-4-392-409> (in Russ.).

19. Rudobashta S. P., Kartashov E. M. *Khimicheskaya tekhnologiya: diffuzionnye protsessy. Chast' 2* [Chemical technology: diffusion processes. Part 2]. Moscow: Yurayt, 2018. 296 p. (in Russ.).

20. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnogo massoperenosa v sisteme «tsementnyy beton - zhidkaya sreda», limitiruemogo vnutrenney diffuziey i vneshney massootdachey [Mathematical modeling of unsteady mass transfer in the system «cement concrete - liquid medium», limited by internal diffusion and external mass transfer] / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2022, issue 1-2, pp. 134–140. EDN: SIGNGF. <http://doi.org/10.31659/0585-430x-2022-799-1-2-134-140> (in Russ.).

21. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Rummyantseva, I. Krasilnikov [et al.]. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 403 LNNS, pp. 1362–1370. EDN: TPZZSD. http://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_152

22. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *Chem-ChemTech*, 2022, vol. 65. issue 7, pp. 61–70. EDN: WBKUAS. <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6606>

23. Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnay bashennoy gradirni, s uchedom tsiklicheski izmenyayushchikhsya parametrov sredy ekspluatatsii [Prediction of durability of reinforced concrete tower cooling tower, taking into account cyclically changing parameters of the operating environment] / V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 3 (44), pp. 89–98. EDN: LYUCXY (in Russ.).

24. Issledovanie vliyaniya temperatury na intensivnost' massoperenosa pri korrozii pervogo vida tsementnykh betonov [Study of the influence of temperature on the intensity of mass transfer during corrosion of the first kind of cement concretes] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 1 (42), pp. 24–31. EDN: UKZZCT (in Russ.).

25. Opreделение vliyaniya vyzakosti nasyshchayushchey zhidkosti na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki tsementnogo kamnya razlichnoy poristosti [Determination of the influence of the viscosity of the saturating liquid on the physico-mechanical characteristics of cement stone of various porosity] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 2 (43), pp. 143–152. EDN: XYRZIF (in Russ.).

26. Transformatsiya prochnosti betona pri ekspluatatsii konstruksii v agressivnoy vozduшной среде s izmenyayushchimisya parametrami [Transformation of concrete strength during operation of the structure in an aggressive air environment with changing parameters] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, U. A. Novikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2023, vol. 3 (48), pp. 158–168. EDN: UPRSB (in Russ.).

27. Modelirovanie massoperenosa agressivnykh rastvorov soley v torkret-betonnom pokrytii [Modeling of mass transfer of aggressive salt solutions in shotcrete coating] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, U. A. Novikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 116–128. EDN: ARLVBF (in Russ.).

28. Samovosstanovlenie betonov modifitsirovaniem spetsial'nymi bakteriyami [Self-

healing of concretes by modification with special bacteria] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, M. V. Tanchev [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2023, vol. 2 (47), pp. 160–167. EDN: YJDBE (in Russ.).

29. Modelirovanie massoperenosa v protsessakh korrozii pervogo vida tsementnykh betonov v sisteme «zhidkost'-rezervuar» pri nalichii vnutrennego istochnika massy v tverдой faze [Modeling of mass transfer in corrosion processes of the first kind of cement concretes in the «liquid-reservoir» system in the presence of an internal mass source in the solid phase] / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, N. S. Kas'yanenko [et al.]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2013, vol. 2 (37), pp. 65–70. EDN: QZJSCJ (in Russ.).

30. Geterogennye fiziko-khimicheskie protsessy massoperenosa agressivnykh veshchestv v strukture betona zhelezobetonnykh konstruksiy, ekspluatiruemykh v gazovoy srede s izmenyayushchimisya parametrami [Heterogeneous physico-chemical processes of mass transfer of aggressive substances in the concrete structure of reinforced concrete structures operated in a gaseous environment with changing parameters] / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 4 (45), pp. 142–152. EDN: VEQJHB (in Russ.).

31. Rumyantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Krasil'nikova I. A. Otsenka effektivnosti nekotorykh sostavov betonnykh smesey, primenyaemykh pri torkretirovanii, po kriteriyam dolgovechnosti [Assessment of the effectiveness of certain concrete mix compositions used in shotcreting, according to durability criteria]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 4 (53), pp. 97–108. EDN: CGJWBL (in Russ.).

Федосов Сергей Викторович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, г. Москва

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва

Академик РААСН, доктор технических наук, профессор

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Fedosov Sergey Viktorovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, Moscow

Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN,
Russian Federation, Moscow

Academician of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Румянцева Варвара Евгеньевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор
E-mail: varrym@gmail.com

Rumyantseva Varvara Evgenievna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
Corresponding Member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: varrym@gmail.com

Красильников Игорь Викторович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор
E-mail: korasb@mail.ru

Krasilnikov Igor Viktorovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
Advisor to the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: korasb@mail.ru

Коринчук Михаил Александрович

Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
аспирант
E-mail: m1na47-74@mail.ru

Korinchuk Michael Aleksandrovich

Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
graduate student
E-mail: m1na47-74@mail.ru

Красильникова Ирина Александровна

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
Российская Федерация, г. Владимир
кандидат технических наук, доцент
E-mail: irinanebukina@rambler.ru

Krasilnikova Irina Aleksandrovna

Vladimir State University,
Russian Federation, Vladimir
Candidate of Technical Sciences, docent
E-mail: irinanebukina@rambler.ru

**УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS (TECHNICAL)**

УДК 614.842
DOI 10.48612/ntp/ma59-b9te-u611

**СООТНОШЕНИЕ РАНГА ПОЖАРА И УРОВНЕЙ УПРАВЛЕНИЯ (I–IV):
УПРАВЛЕНЧЕСКАЯ ЗРЕЛОСТЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА
КАК КРИТЕРИЙ СООТВЕТСТВИЯ СЛОЖНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ**

И. П. ДЕНИСОВ

Ветеран МЧС России
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: pom.polet99@mail.ru

В предыдущих работах автора были рассмотрены многокритериальные модели управления подразделениями пожарной охраны при тушении пожаров в резервуарных парках, вызванных военными средствами поражения, где ключевым фактором успеха является качество управленческих решений в условиях экстремальной неопределенности. Цель данного исследования формализовать ранг пожара как управленческую категорию, отграничить его от ресурсной категории «номер вызова» и предложить модель уровней управления (I–IV), в которой управленческая зрелость руководителя тушения пожара (РТП) выступает критерием соответствия сложности задачи. Используются структурно-функциональный анализ системы управления тушением пожара, сравнительный анализ отечественных и международных подходов (ICS), методы формализации управленческих категорий и риск-ориентированного анализа. Введено понятие ранга пожара как динамической характеристики сложности управленческой задачи. Обосновано, что номер вызова отвечает за объем ресурсов, а ранг – за требуемый уровень управления. Разработана четырехуровневая модель управления (I – регламентное, II – ситуационно-тактическое, III – риск-ориентированное, IV – системное), где каждый уровень соотносится с определенной степенью неопределенности, риска и типом управленческих решений. Показано, что РТП является не штатной должностью, а квалификационным статусом, реализуемым через категорию «управленческая зрелость», включающую способность к своевременной эскалации управления. Предложенная модель коррелирует с цвето-металлическими моделями ICS (Bronze/Silver/Gold/Platinum) и развивает их применительно к отечественной практике. Выявлено, что психологическая устойчивость управления является неотъемлемым компонентом управленческой зрелости и интегрирована в описание каждого уровня. Сформулированы объективные признаки для повышения и понижения ранга пожара в ходе его развития. Переход от количественной оценки пожара (номер вызова) к содержательной (ранг пожара) создает методологическую основу для унификации критериев оценки действий РТП, повышения обоснованности управленческой эскалации и совершенствования программ подготовки руководящего состава с учетом опыта тушения сложных пожаров, в том числе в условиях военных действий.

Ключевые слова: ранг пожара; уровень управления; управленческая зрелость; РТП; эскалация управления; психологическая устойчивость управления; риск-ориентированное управление; резервуарные парки; многокритериальные модели.

**THE RELATIONSHIP BETWEEN FIRE RANK DYNAMICS
AND MANAGEMENT LEVELS (I–IV): INCIDENT COMMANDER
MANAGERIAL MATURITY AS A CRITERION OF CORRESPONDENCE
TO THE MANAGERIAL TASK COMPLEXITY**

I. P. DENISOV

Veteran of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
E-mail: pom.polet99@mail.ru

In the author's previous works, multi-criteria models for managing fire departments during firefighting operations in tank farms caused by military weapons were examined, where the key success factor is the quality of management decisions under conditions of extreme uncertainty. The purpose of this study is to formalize the fire rank as a management category, distinguish it from the resource category of «alarm level» (dispatch number), and propose a four-level management model (I–IV), in which the managerial maturity of the Incident Commander (IC) serves as the criterion for matching the complexity of the task.

The research employs structural-functional analysis of the firefighting management system, a comparative analysis of domestic and international approaches (such as the Incident Command System - ICS), and methods of formalizing management categories and risk-oriented analysis. The concept of «fire rank» is introduced as a dynamic characteristic of the management task's complexity. It is substantiated that the alarm level (dispatch number) is responsible for the volume of resources, while the rank determines the required level of command.

A four-level management model has been developed: I – Regulatory, II – Situational-Tactical, III – Risk-Oriented, and IV – Systemic, where each level corresponds to a specific degree of uncertainty, risk, and type of management decisions. It is demonstrated that the Incident Commander is not merely a staff position but a qualification status realized through the category of «managerial maturity,» which includes the ability for timely management escalation.

Discussion: The proposed model correlates with the color/metal-coded ICS models (Bronze/Silver/Gold/Platinum) and adapts them to domestic practice. It was found that the psychological resilience of command is an inherent component of managerial maturity and is integrated into the description of each level. Objective criteria for increasing or decreasing the fire rank during its progression are formulated. The transition from a quantitative assessment of a fire (alarm level) to a qualitative one (fire rank) creates a methodological basis for unifying the criteria for evaluating IC actions, increasing the justification for management escalation, and improving training programs for senior staff, considering the experience of extinguishing complex fires, including those in combat conditions.

Keywords: fire rank; management level; managerial maturity; incident commander; management escalation; psychological resilience of management; risk-oriented management; tank farms; multi-criteria models.

Современные пожары, особенно на объектах повышенной опасности, таких как резервуарные парки хранения нефтепродуктов (РПХН), характеризуются высоким уровнем неопределенности, быстрым развитием и наличием множества рисков. Как показано в предыдущих исследованиях автора [1], применение современных военных средств поражения приводит к комбинированным пожарам, требующим адаптации тактики и управления. Эффективность тушения в таких условиях напрямую зависит от качества управленческих решений, принимаемых руководителем тушения пожара (РТП). Однако существующая система оценки сложности пожара через «номер вызова» (организационно-ресурсную категорию) не в полной мере отражает управленческую сложность задачи, стоящую перед РТП.

Целью настоящего исследования является формализация ранга пожара как управленческой категории, отграничение его от ресурсной категории «номер вызова» и разработка модели уровней управления (I–IV), в которой управленческая зрелость РТП выступает критерием соответствия сложности решаемой задачи.

В работе использованы методы структурно-функционального анализа системы управления тушением пожара, сравнительного

анализа отечественных и международных подходов к управлению инцидентами (Incident Command System – ICS), формализации управленческих категорий и риск-ориентированного анализа решений в условиях неопределенности. Теоретической базой послужили работы в области теории управления организационными системами [2], принятия решений в условиях неопределенности [3–4], а также анализ опыта тушения крупных пожаров на объектах хранения нефтепродуктов [1].

Результаты исследования:

1. Номер вызова и ранг пожара: разграничение управленческих смыслов.

Номер вызова по своей природе является организационно-ресурсной и диспетчерской категорией, предназначенной для определения состава и объема сил и средств, а также порядка их привлечения. Он отвечает на вопрос: «Какие ресурсы и в каком объеме необходимо направить?»

Ранг пожара предлагается рассматривать как управленческую категорию, отражающую сложность управленческой задачи и требования к уровню управления в конкретной обстановке. Он отвечает на вопрос: «Какого уровня управления требует сложившаяся обстановка?»

Управленческое определение ранга пожара. Ранг пожара – динамическая характеристика сложности управленческой задачи при тушении пожара, определяемая уровнем неопределенности, рисками для личного состава, наличием альтернативных решений с необратимыми последствиями и необходимостью выстраивания соответствующей структуры управления.

2. Руководитель тушения пожара как квалификация и категория «управленческая зрелость».

Руководитель тушения пожара (РТП) не является штатной должностью, предусмотренной штатным расписанием организации. РТП¹ – это квалификационный статус сотрудника, подтверждающий право и способность руководить силами и средствами непосредственно при тушении пожара [5–6]. Штатная должность лица определяет пределы организационных полномочий, однако управленческая роль РТП реализуется в конкретной обстановке пожара и определяется фактической сложностью управленческой задачи.

Управленческая зрелость РТП – это совокупность профессиональных качеств, позволяющих:

- а) распознавать фактическую сложность управленческой задачи;
- б) принимать решения в условиях неопределенности [3–4];
- в) оценивать риски и последствия альтернативных действий²;
- г) выстраивать структуру управления, адекватную рангу пожара;
- д) своевременно инициировать эскалацию управления при превышении собственной управленческой компетенции.

3. Уровни управления (I–IV) и их корреляция с рангом пожара.

В мировой практике управления пожарами широко применяется система ICS, в рамках которой используется цвето-металлическая модель уровней управления (Bronze / Silver / Gold / Platinum), описывающая глубину управленческого мышления и тип задачи, а не должности³ [7]. Для обеспечения терминологической совместимости предлагается модель уровней I–IV (таблица).

Таблица. Соответствие уровней управления, признаков обстановки и психологической устойчивости

Уровень управления (ранг пожара)	Тип управления	Ключевые признаки обстановки	Проявление психологической устойчивости управления
Уровень I	Регламентное управление	Минимальная неопределенность, стандартные алгоритмы, отсутствие альтернатив	Личностный характер: сохранение самообладания, корректность исполнения регламентных действий
Уровень II	Ситуационно-тактическое управление	Неполная/противоречивая информация, необходимость маневра силами, угроза людям	Сохранение рациональности в динамике, контроль функционального состояния личного состава, предотвращение дезорганизации
Уровень III	Риск-ориентированное управление	Наличие альтернатив с необратимыми последствиями, конфликт «тушение-безопасность», риск внезапного ухудшения условий	Осознанное управление функциональным состоянием личного состава, обеспечение соразмерности риска [2], сохранение управляемости при высокой нагрузке
Уровень IV	Системное управление	Неприменимость стандартных решений, доминирование техногенных рисков, конкурирующие приоритеты, координация различных ведомств	Контроль состояния штаба и руководителей направлений, осознанное управление психологической нагрузкой, принятие решений при отсутствии алгоритмов [3–4]

¹ Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности»

² ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство.

³ FEMA. National Incident Management System (NIMS): Incident Command System (ICS). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency. URL: <https://www.fema.gov/emergency-managers/nims> (дата обращения: 12.02.2026).

Принципиальным является то, что наличие хотя бы одного признака более высокого уровня означает соответствующий уровень управления и ранг пожара, независимо от номера вызова и объема привлеченных сил.

4. Динамика ранга пожара и механизм эскалации.

Ранг пожара является динамической величиной. Повышение ранга обосновано при появлении признаков более высокого уровня управления и (или) при несоответствии текущей структуры управления фактической сложности задачи, снижении управленческой устойчивости, в том числе в утрате психологической устойчивости управления, и невозможности обеспечивать соразмерность риска. Понижение ранга допустимо при одновременной стабилизации управленческой картины, снижении рисков для личного состава до контролируемых, устранении альтернатив с необратимыми последствиями, восстановлении психологической устойчивости управления и возврате к стандартным сценариям.

Особую значимость этот механизм приобретает при тушении пожаров в РПХН, особенно вызванных военными средствами поражения, где, как отмечено в [1], присутствуют такие критерии как угроза повторных ударов, высокая психологическая нагрузка и необходимость межведомственной координации. Данные факторы однозначно требуют перехода на уровень III или IV, независимо от количества привлеченных стволов или отделений.

Предложенная модель уровней управления (I–IV) развивает подходы, заложенные в системе ICS⁴ [7], и адаптирует их к отечественной практике пожаротушения. В отличие от традиционного деления пожаров по номерам (рангам), основанного на количестве привлеченных сил, наш подход делает акцент на качественной

стороне управления – уровне неопределенности и типе решений. Это согласуется с современными теориями менеджмента риска и принятия решений в сложных средах [3–4].

Введение категории «управленческая зрелость» позволяет преодолеть противоречие между штатной должностью РТП и фактической сложностью задачи. Как показано в [1], в экстремальных условиях военных действий даже опытный руководитель может столкнуться с необходимостью эскалации управления. Предложенные в таблице признаки дают объективные основания для такой эскалации, что критически важно для обеспечения безопасности личного состава и эффективности тушения.

Рассмотрение ранга пожара как управленческой категории позволяет перейти от количественного и формального подхода к содержательной оценке сложности управления пожаротушением. Введение понятия управленческой зрелости и уровней управления (I–IV) создает основу для:

1. Методологически корректного разграничения ресурсного реагирования (номер вызова) и управленческой сложности (ранг пожара).

2. Унификации критериев оценки управленческих решений РТП, в том числе при разборе пожаров.

3. Развития практики принятия решений в условиях неопределенности и программ подготовки руководящего состава, с учетом опыта тушения сложных пожаров на объектах хранения нефтепродуктов [1].

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку количественных методов идентификации уровня управления на основе предложенных признаков и интеграцию модели в автоматизированные системы поддержки принятия решений для РТП.

Список литературы

1. Денисов И. П. Перечень критериев, влияющих на управление подразделениями пожарной охраны на пожарах в резервуарных парках хранения нефтепродуктов, вызванных современными военными средствами поражения // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2025. № 1 (54). С. 1–4.

2. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М.: Физматлит, 2005. 584 с.

3. A Recognition-Primed Decision (RPD) Model of Rapid Decision Making. *Decision Making*

in Action: Models and Methods / G. A. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood [et al.]. Norwood, NJ: Ablex, 1993, pp. 138–147.

4. Weick K. E., Sutcliffe K. M. *Managing the Unexpected: Sustained Performance in a Complex World*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

5. Иванников В. П., Ключ П. П. *Справочник руководителя тушения пожара*. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.

6. Журавлев Н. М., Денисов А. Н. Анализ причин для разработки системы поддержки принятия управленческих решений руководителя тушения пожаров // *Вестник Санкт-Петербур-*

⁴FEMA. National Incident Management System (NIMS): Incident Command System (ICS). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency. URL:

<https://www.fema.gov/emergency-managers/nims> (дата обращения: 12.02.2026).

бургского университета ГПС МЧС России. 2020. № 2. С. 78–85.

7. Bigley G. A., Roberts K. H. The Incident Command System: High-Reliability Organizing for Complex and Volatile Task Environments. *Academy of Management Journal*, 2001, vol. 44, issue 6, pp. 1281–1299. DOI: 10.2307/3069401.

References

1. Denisov I. P. Perechen' kriteriev, vliyayushchikh na upravlenie podrazdeleniyami pozhar-noy okhrany na pozharakh v rezervuarnykh parkakh khraneniya nefteproduktov, vyzvannykh sovremennymi voennymi sredstvami porazheniya [List of criteria affecting the management of fire protection units in case of fires in oil product storage tank farms associated with modern military means of destruction]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2025, vol. 1 (54), pp. 1–4.

2. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: Fizmatlit, 2005. 584 p.

3. A Recognition-Primed Decision (RPD) Model of Rapid Decision Making. *Decision Making*

in Action: Models and Methods / G. A. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood [et al.]. Norwood, NJ: Ablex, 1993, pp. 138–147.

4. Weick K. E., Sutcliffe K. M. *Managing the Unexpected: Sustained Performance in a Complex World*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

5. Ivannikov V. P., Klyus P. P. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [Handbook of the fire extinguishing manager]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 288 p.

6. Zhuravlev N. M., Denisov A. N. Analiz prichin dlya razrabotki sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy rukovoditelya tusheniya pozharov [Analysis of reasons for developing a decision support system for fire extinguishing managers]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPs MChS Rossii*, 2020, issue 2, pp. 78–85.

7. Bigley G. A., Roberts K. H. The Incident Command System: High-Reliability Organizing for Complex and Volatile Task Environments. *Academy of Management Journal*, 2001, vol. 44, issue 6, pp. 1281–1299. DOI: 10.2307/3069401.

Денисов Илья Павлович

Ветеран МЧС России

Российская Федерация, г. Москва

E-mail: pom.polet99@mail.ru

Denisov Ilya Pavlovich

Veteran of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Russian Federation, Moscow

E-mail: pom.polet99@mail.ru

УДК 004.021

DOI 10.48612/ntp/eghf-fu36-t47p

СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЕЖУРНОЙ СМЕНЫ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ В КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЯХ

А. О. СЕМЕНОВ¹, Л. В. СУХОВЕРХОВА², А. В. СМИРНОВ², С. В. ОРЕШКОВ²

¹ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

² Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва

E-mail: ao-semenov@mail.ru, l.suhoverhova@academygps.ru, An.Smirnov@academygps.ru

Проведенный в статье анализ чрезвычайных ситуаций и материального ущерба, наносимого экономике страны, показывает актуальность задач по совершенствованию прогнозирования чрезвычайных ситуаций и управления силами и средствами при угрозе их возникновения. Работа посвящена разработке системы информационной поддержки деятельности оперативной дежурной смены центра управления в кризисных ситуациях, позволяющей начальнику смены рационально распределять задачи, контролировать сроки их выполнения и устранять ошибки. Задача формулируется в виде исходных предположений и ограничений, в которых отражены основные положения и начальные данные, на основании которых создается информационная система. Решение задачи строится с использованием теоретических положений системного анализа, теории управления и информатики. В статье проведен анализ чрезвычайных ситуаций различной природы и характера, рассмотрена организационная структура оперативной дежурной смены, предложено описание трехуровневой архитектуры системы и блок-схема алгоритма ее функционирования. Дано подробное описание каждого блока алгоритма. В заключении сделан вывод о преимуществах, перспективах внедрения и возможном использовании программного обеспечения для повышения уровня управляемости силами и средствами оперативной дежурной смены в повседневной деятельности и в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: оперативная дежурная смена, информационная система, управление в чрезвычайных ситуациях, автоматизация контроля.

INFORMATION SUPPORT SYSTEM FOR CRISIS MANAGEMENT CENTER DUTY SHIFT OPERATIONS

A. O. SEMENOV¹, L. V. SUKHOVERKHOVA², A. V. SMIRNOV², S. V. ORESHKOV²

¹ Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief»
Russian Federation, Moscow

E-mail: ao-semenov@mail.ru, l.suhoverhova@academygps.ru, An.Smirnov@academygps.ru

The analysis of emergency situations and the material damage inflicted on the country's economy, as presented in the article, demonstrates the urgency of improving emergency forecasting and the management of forces and resources when such threats arise. This work is dedicated to developing an information support system for the operational duty shift of a crisis management center. The system enables the shift supervisor to allocate tasks rationally, monitor their execution deadlines, and eliminate errors. The problem is formulated as a set of initial assumptions and constraints that reflect the core principles and baseline data used to build the information system. The solution is developed using the theoretical foundations of systems analysis, control theory, and computer science. The article provides an analysis of emergencies of various natures and types, examines the organizational structure of the operational duty shift, and proposes a description of the system's three-tier architecture along with a flowchart of its operational algorithm. A detailed description of

each algorithm block is provided. In conclusion, the advantages, implementation prospects, and potential uses of the software are summarized. Its application is aimed at enhancing the management level of the operational duty shift's forces and resources during both day-to-day operations and emergency situations.

Key words: operational shift on duty, information system, emergency management, automation of control.

Введение

Государственная политика Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера является одной из важнейших задач и является частью системы государственного управления в сфере национальной безопасности Российской Федерации¹. На протяжении десятилетий высокий уровень защиты гражданского населения обеспечивается благодаря созданной и непрерывно совершенствующейся единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее – РСЧС).

Анализ источников, рассматривающий вопросы состояния защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за последние десять лет² показывает, что в период с 2015 год по 2019 год наблюдается переход от относительно стабильного режима к фазе роста (рис. 1). Рост чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) в 2020 году совпадает с

началом пандемии COVID-19 и достигает пиковых значений в 2021 году, что соответствует теоретическим положениям о глобальных кризисных явлениях, как катализаторах возникновения ЧС различной природы и характера. На рис. 2 представлена динамика материального ущерба, наносимого экономике страны в результате чрезвычайных ситуаций, в период с 2014 года по 2024 год. Анализ показывает синхронность динамики материального ущерба с частотными характеристиками ЧС (рис. 1). Начиная с 2019 года, наблюдается акселерация роста экономических потерь с наибольшим значением в 2020 году (около 164 млн руб.).

Представленный анализ показывает достаточно высокий уровень работы органов государственной власти Российской Федерации в рамках РСЧС относительно современных вызовов. Однако, выявленные тренды указывают на то, что задачи по совершенствованию прогнозирования ЧС, управления силами и средствами при угрозе и наступлении чрезвычайных ситуаций остаются актуальными.



Рис. 1. Чрезвычайные ситуации в Российской Федерации в период с 2015 года по 2024 год

¹ Указ Президента РФ от 11 января 2018 года №12 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года»

² Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году». М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018, 376 с.



Рис. 2. Материальный ущерб от чрезвычайных ситуаций с 2015 года по 2024 год

В Российской Федерации функционируют Национальный центр управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России (далее – НЦУКС), межрегиональные и региональные Центры управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России (далее – ЦУКС). Вместе они составляют важную часть повседневного управления РСЧС. Эффективная работа НЦУКС и ЦУКС базируется на оперативном реагировании в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Оперативное реагирование наиболее эффективно, если выполнены следующие условия:

- 1) предусмотрена укомплектованность личным составом реагирующих подразделений силами и средствами;
- 2) разработан план реагирования в условиях ЧС (принятие обоснованного управленческого решения в рамках дефицита времени);
- 3) организовано несение оперативного дежурства (качественная обработка полученной информации, своевременная передача сведений о ЧС)³.

Основная работа по мониторингу и реагированию возложена на оперативную дежурную смену (далее – ОДС) ЦУКС, которая функционирует круглосуточно. У каждого специалиста в задачах присутствует строгий регламент представления информационно-отчетных документов в зависимости от режимов, которых различают: а) повседневная деятельность – при

отсутствии угрозы возникновения чрезвычайной ситуации; б) повышенная готовность – при угрозе возникновения чрезвычайной ситуации; в) чрезвычайная ситуация – при возникновении и ликвидации чрезвычайной ситуации [2]. На рис. 3 представлена типизированная усредненная модель, которая иллюстрирует качественную разницу между двумя режимами работы ОДС ЦУКС «повседневная деятельность» и «чрезвычайная ситуация».

ОДС – это статическая структура, состав ее неизменен для каждого региона и рассчитывается согласно ГОСТ Р 22.7.01-2021, поэтому для повышения уровня оперативного реагирования необходимо сокращать время обработки информации и повышать ее качество. В современных условиях этого возможно достичь, если автоматизировать рутинные повседневные действия ОДС⁴, а также внедрить систему автоматизированного контроля для руководителя ОДС. Старший оперативный дежурный является руководителем смены и несет ответственность за ее работу. От его профессионализма зависят скорость и точность распределения задач, а также контроль над их исполнением.

Настоящая работа посвящена совершенствованию системы информационного обеспечения ОДС, позволяющего руководителю смены качественно распределять задачи, контролировать сроки их выполнения и исключать ошибки.

³ Приказ МЧС России №1131 от 01.11.2023 г. «Об утверждении Положения об организации оперативного дежурства в органах повседневного управления МЧС России»

⁴ Методические рекомендации территориальным органам Министерства Российской Федерации по

делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий по организации оповещения и информирования органов управления населения при возникновении (угрозе) чрезвычайной ситуации» (утв. МЧС России 25.01.2012)

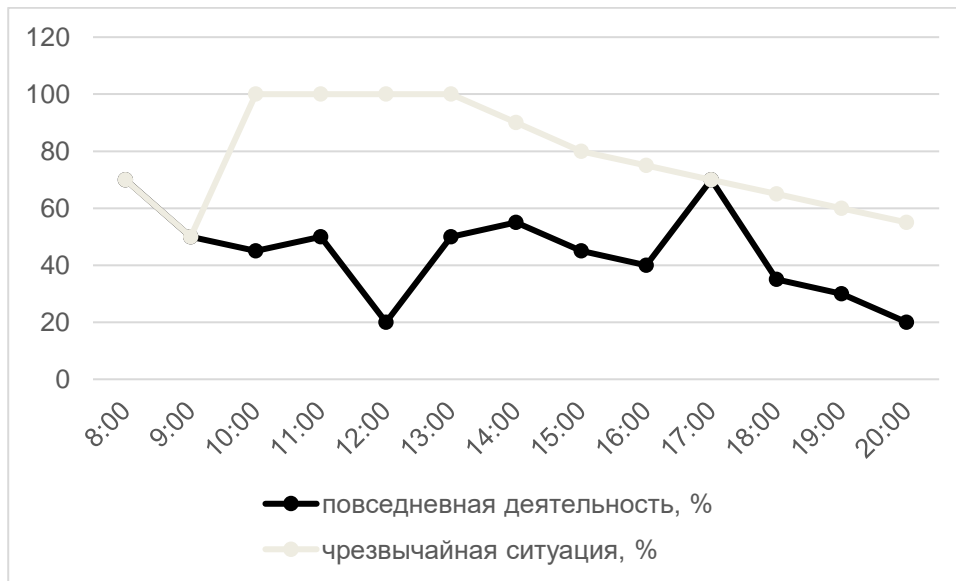


Рис. 3. Уровень загрузки ОДС в режиме «повседневная деятельность» и «чрезвычайная ситуация»

Постановка задачи

Введем исходные допущения и ограничения.

Ω_1 : построение информационной системы будем вести для регионального ЦУКС. На рис. 4 приведена схема взаимодействия сотрудников ЦУКС, где АРМ1 – старший оперативный дежурный (СОД); АРМ2 – начальник дежурной смены; АРМ3 – специалист по оповещению и информированию; АРМ4 – специалист по применению сил и средств; АРМ5 – специалист по анализу и подготовке оперативных данных; АРМ6 – специалист по реагированию на ЧС (старший оперативной группы); АРМ7 – специалист по учёту сил и контролю за пожарной обстановкой; АРМ8 – специалист по цифровой информации, ГИС-технологиям; АРМ9 – специалист по мониторингу и прогнозу развития ЧС; АРМ10 – диспетчер службы оперативного обеспечения диспетчерской связи; АРМ11 – специалист по техническому обеспечению, организации связи (организация связи (ВКС) в районе ЧС в составе оперативной группы); АРМ12 – специалист по видеоконференцсвязи – дежурный по связи, ГУ – главное управление, ЕДДС – единая дежурно-диспетчерская служба.

Ω_2 : задачи Z_{ik} ($i = \overline{2, m}$ – номер оператора АРМ, m – количество операторов в региональном ЦУКС, $k = \overline{1, n}$ – номер задачи, n – количество задач) для сотрудников ОДС ставятся и контролируются старшим оперативным дежурным (АРМ1).

Ω_3 : действия сотрудников ОДС имеют регламент. Для каждой задачи Z_{ik} назначается

время ее выполнения t_{ik} .

Ω_4 : задача Z_{ik} считается выполненной, если за время $\tau \leq t_{ik}$, где τ – фактическое время выполнения задачи, сформирован корректный отчет R_{ik} .

Ω_5 : оптимизацию по времени для управления деятельностью ОДС запишем в виде

$$\min \sum_{i=2}^m \sum_{k=1}^n [\alpha \tau_{ik} + \beta \max(0, \tau_{ik} - t_{ik}) + \gamma(1 - R_{ik})], \quad (1)$$

где α, β, γ – весовые коэффициенты приоритетов, которые подбираются на основе экспертных оценок и статистических данных, для повышения эффективности управляемости ОДС.

1. Ограничение на корректность отчетов

$$R_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если отчет корректен;} \\ 0, & \text{если отчет с ошибками.} \end{cases} \quad (2)$$

2. Ограничение на время выполнения

$$\tau_{ik} > 0, \quad \forall i = 2, \dots, m, \quad \forall k = 1, \dots, n. \quad (3)$$

3. Условие выполнения оптимизации по времени

$$Z_{ik} \text{ выполнена} \iff \tau_{ik} \leq t_{ik} \text{ и } R_{ik} = 1 \quad (4)$$

Требуется разработать для исходных данных $\Omega_1 - \Omega_5$ систему информационного обеспечения деятельности дежурной смены ЦУКС.

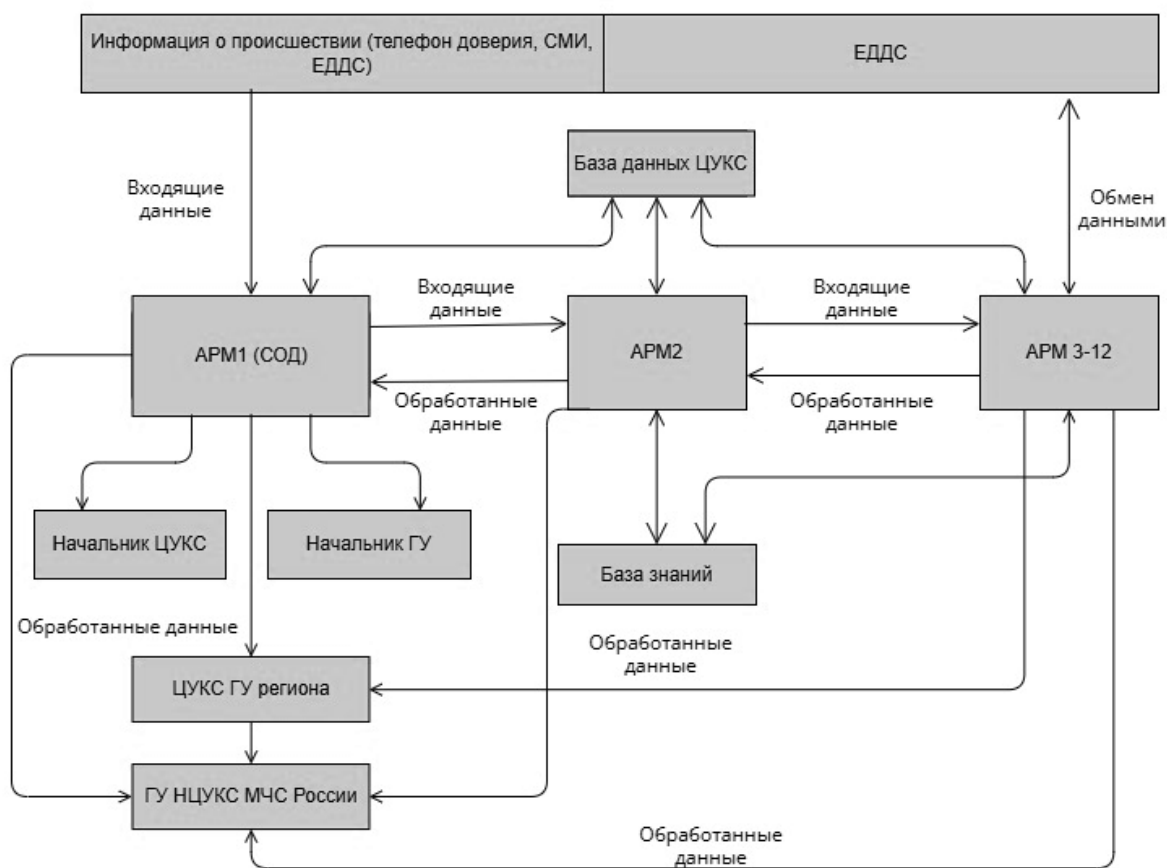


Рис. 4. Схема взаимодействия оперативной дежурной смены регионального ЦУКС

Результат исследования

Для разработки архитектуры информационной системы деятельности ОДС следует выделить основные требования, предъявляемые к ней:

- необходимость в реальном времени отслеживать деятельность оперативной дежурной смены;
- обеспечивать быструю передачу актуальной информации между различными модулями системы;
- устойчивость (масштабируемость) к пиковым нагрузкам в режиме «чрезвычайная ситуация», а также для будущего ее совершенствования в соответствии с меняющимися условиями работы;
- надежность и безопасность.

Указанным требованиям в большей степени отвечает трехуровневая клиент-серверная модель [3], представленная на рис. 5.

Описание компонентов уровней информационной системы обеспечения деятельности

ОДС, их назначение и функции представим в табл. 1–3.

Уровень Сервера приложений (табл. 2) является ядром информационной системы обеспечения деятельности ОДС, реализующее основную функциональность. Взаимодействие между модулями системы осуществляется через внутренние API, обеспечивая высокую скорость передачи данных и минимизацию задержек. Модули могут обмениваться информацией как в однонаправленном, так и в двунаправленном режиме (рис. 5).

Алгоритм работы информационной системы обеспечения деятельности ОДС формализуем в виде блок-схемы, представленный на рис. 6.

Работа алгоритма начинается с момента поступления сигнала об инциденте – первый блок, регистрация инцидента (создание карточки) происходит во втором блоке, далее СОД назначает задачи Z_{ik} сотрудникам ОДС с указанием сроков t_{ik} .



Рис. 5. Трехуровневая архитектура информационной системы обеспечения деятельности ОДС

Таблица 1. Уровень данных (сервер базы данных)

№	Название	Назначение	Использование в ИС
1.	База данных ЦУКС	Сбор, хранение оперативной и справочной информации (оцифрованные регламенты, приказы, должностные инструкции и пр.).	Модуль анализа соответствия (уровень Сервер приложений) использует ее как эталон для автоматической проверки действий сотрудников.
2.	База знаний	Сбор, хранение информации о типе и месте события, на основании которой выбирается заранее подготовленный экспертами план, данных контроля о ходе исполнения плана, которые используются для его коррекции в соответствии с оперативной обстановкой, складывающейся на месте события.	Сервер приложений подписывается на события и периодически опрашивает Базу знаний для фиксации действий сотрудников АРМ 2-12.
3.	База данных ИС (вновь создаваемая)	Хранение данных, генерируемых непосредственно информационной системой обеспечения деятельности ОДС.	Применяется для заполнения: а) Таблицы поставленных задач: ID, инцидент, исполнитель (АРМ), описание, срок, статус. б) Таблицы журнала действий: ID, сотрудник, действие, временная метка, инцидент. в) Таблицы уведомлений: ID, тип, описание, получатель, статус прочтения. г) Таблицы отчетов.

Таблица 2. Уровень Сервера приложений

№	Название	Назначение
1.	Модуль контроля задач	Прием команд от АРМ1 на постановку задач, их регистрация в БД, рассылка уведомлений исполнителям (АРМ 3-12), отслеживание статусов выполнения (не начато, в работе, выполнено, просрочено).
2.	Модуль анализа соответствия регламентам	Постоянный мониторинг Базы данных ЦУКС и сопоставление действий сотрудников с правилами из Базы знаний. При обнаружении отклонения (например, невыполненное обязательное действие) формирует инцидент и передает данные в Модуль уведомлений.

№	Название	Назначение
3.	Модуль отчетности	Автоматическое формирование отчетов на основе данных из всех БД: сменные рапорты, отчеты по инцидентам, статистика работы смены и пр.
4.	Сервис реального времени	Поддержка постоянного соединения с уровнем пользователей для мгновенной передачи уведомлений СОД и обновления данных на панели управления без перезагрузки страницы.
5.	REST API (Application Programming Interface) – архитектурный стиль	Обеспечение стандартизированного и безопасного взаимодействия между сервером и всеми пользовательскими приложениями (СОД, АРМ 2-12, мобильное приложение).

Таблица 3. Пользовательский уровень

№	Пользователь	Функциональные возможности
1.	АРМ1 (панель управления СОД)	а) Сводная панель (Dashboard): отображение активных инцидентов, статусов задач по всем АРМ, графика нарушений в реальном времени. б) Модуль постановки задач: форма для назначения задач с выбором исполнителя и срока. в) Журнал событий: фильтруемая лента всех действий смены. г) Центр уведомлений: всплывающие оповещения о просрочках и нарушениях регламента.
2.	АРМ 2-12 (Интерфейс исполнителя)	Просмотр назначенных задач, изменение их статуса, внесение отчетов о проделанной работе.
3.	Мобильное приложение для СОД (оповещения)	Получение push-уведомлений о критических событиях (просрочка высокой важности, нарушение ключевого регламента) когда СОД не находится за своим основным АРМ.



Рис. 6. Алгоритм работы информационной системы обеспечения деятельности ОДС

В четвертом блоке происходит выполнение задач, а также фиксация результатов работ в системе. Пунктирная стрелка ведет к блоку 3 и показывает обратную связь с СОД. В пятом блоке производится: 1) автоматический контроль сроков выполнения; 2) сверка действий с регламентами (нормативной базой); 3) формирование уведомлений для СОД при нарушениях. В шестом блоке происходит автоматическое ведение электронного журнала, формирование отчетов R_{ik} (сменных, по инцидентам, статистических). Пятый и шестой блоки соответствуют Серверу приложений (рис. 5) – ядро системы. Архивация данных по инциденту, закрытие карточки осуществляется в седьмом блоке. Алгоритм завершается в восьмом блоке закрытием карточки инцидента. Базы данных алгоритма описаны в табл. 1.

Выводы

Внедрение разработанной информационной системы обеспечения деятельности ОДС позволит принципиально повысить уровень управляемости и эффективности ее работы за счет следующих ключевых факторов:

- система в реальном времени отслеживает соблюдение регламентов и сроков, а также заблаговременно предупреждает СОД о рисках срыва задач, что позволит предотвращать сбои, а не просто реагировать на них;

– достижение прозрачности действий сотрудников, что упрощает анализ и повышает ответственность;

– система выступает в роли «интеллектуального помощника», которая автоматизирует рутинный контроль и акцентирует внимание СОД только на отклонениях и критических точках через систему оповещений, что позволяет СОД сконцентрироваться на стратегических решениях, а не на тактическом контроле;

– положения приказов и инструкций транслируются в исполняемые системой алгоритмы, что гарантирует действия каждого сотрудника по утвержденному плану, минимизируя вероятность ошибок в критических ситуациях;

– СОД получает актуальную сводку по обстановке в режиме реального времени на единой панели управления. Автоматическое формирование отчетов и журналов высвобождает время для непосредственного управления ситуацией;

– накопленная статистика по времени реакции, типичным ошибкам и эффективности процедур позволит выявлять «узкие места», оптимизировать регламенты и целенаправленно

работать над повышением квалификации сотрудников.

Разработанная система представляет собой качественно новую среду управления, которая для старшего оперативного дежурного становится источником получения объективной информации в условиях дефицита времени. Для ОДС – создает дисциплинирующую и поддерживающую среду, где регламенты не просто написаны на бумаге, а являются реальной основой ежедневной работы. Для руководства ЦУКС – предоставляет объективные данные для стратегического планирования и оценки эффективности. В будущем при накоплении статистических данных разрабатываемая система позволит совершенствовать управление ОДС, реализуя математические соотношения из Ω_5 .

Таким образом, внедрение системы позволит повысить уровень управления ОДС за счет синергии человека и технологии, где человек (СОД) отвечает за стратегическое мышление и принятие сложных решений, а технология берет на себя гарантированное выполнение тактического контроля, мониторинга и обеспечения данными.

Список литературы

1. Очередыко М. В., Белоусов Р. Л., Рыбаков А. В. О результатах системного анализа оперативности реагирования центра управления в кризисных ситуациях при ликвидации чрезвычайных ситуаций // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. № 2 (41). С. 51–60.

2. Суховерхова Л. В., Сороковинова Е. В. Программное обеспечение для обработки информации в кризисной ситуации на примере Иркутской области / Системы безопасности – 2023: сборник материалов 32 Международной научно-технической конференции, М.: Академия Государственной противопожарной службы. С. 109–112.

3. Ананченко И. В., Войтюк Т. Е., Марченко Е. В. Архитектура информационных систем: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2024. 58 с.

References

1. Ochered'ko M. V., Belousov R. L., Rybakov A. V. O rezultatakh sistemnogo analiza operativnosti reagirovaniya tsentra upravleniya v krizisnykh situatsiyakh pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy [On the results of the systemic analysis of the crisis management center's response timeliness during emergency response] *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2019, vol. 2 (41). pp. 51–60.

2. Sukhoverkhova L. V., Sorokovikova E. V. Programmnoye obespecheniye dlya obrabotki informatsii v krizisnoy situatsii na primere Irkutskoy oblasti [Software for information processing in a crisis situation using the Irkutsk Region as a case study]. *Sistemy bezopasnosti – 2023: sbornik materialov 32 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2023, Moscow: Akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby. Pp. 109–112.

3. Ananchenko I. V., Voytyuk T. E., Marchenko E. V. *Arkhitektura informatsionnykh sistem: uchebnoye posobiye* [Architecture of Information Systems: A Textbook]. SPb.: Universitet ITMO, 2024. 58 p.

Семенов Алексей Олегович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент кафедры

E-mail: ao-semenov@mail.ru

Seменов Alexey Olegovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Moscow

candidate of technical sciences, associate professor of the department

E-mail: ao-semenov@mail.ru

Суховерхова Людмила Васильевна

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

кандидат технических наук

E-mail: l.suhoverhova@academygps.ru

Suhoverhova Lyudmila Vasil`evna

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief»,

Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences

E-mail: l.suhoverhova@academygps.ru

Смирнов Андрей Владимирович

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

кандидат технических наук

E-mail: An.Smirnov@academygps.ru

Smirnov Andrej Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief»,

Russian Federation, Moscow

Candidate of Technical Sciences

E-mail: An.Smirnov@academygps.ru

Орешков Сергей Владимирович

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

E-mail: myurkhin@mail.ru

Oreshkov Sergey Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief»,

Russian Federation, Moscow

E-mail: myurkhin@mail.ru

УДК 614.8:004.942

DOI 10.48612/ntp/xmd7-ertb-f5gt

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПРИМЕНЕНИЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ КООРДИНАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ, ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ В ЛИКВИДАЦИИ ЧС

С. Ю. ЩУКАРЕВ, А. И. ЗАКИНЧАК

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: shukarev@mail.ru, zakinchak@mail.ru,

Целью исследования является совершенствование подходов к применению беспилотных летательных аппаратов для координации деятельности подразделений, задействованных в ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также разработка формализованной модели выбора оптимальных типов беспилотных летательных аппаратов для решения различных оперативных задач. В качестве методов исследования использованы системный анализ, структурно-функциональное моделирование, метод кластеризации механизмов координации, а также математическое моделирование в форме нормализованной взвешенной оценки эффективности и целочисленного линейного программирования для оптимального распределения беспилотных летательных аппаратов при ограниченных ресурсах. Анализ отечественных и зарубежных источников позволил оценить современные практики использования беспилотных летательных аппаратов и выделить ключевые функциональные направления их применения.

Основные результаты исследования включают разработанную классификацию механизмов координации действий спасательных подразделений с применением беспилотных летательных аппаратов, сопоставление их типов с задачами ликвидации ЧС, а также формирование математической модели выбора оптимального аппарата в зависимости от критериев миссии. В работе также предложена таблица типологизации беспилотных летательных аппаратов по ключевым параметрам и управленческим преимуществам, а также усовершенствованный алгоритм принятия решений, сопоставляющий потребности ликвидаторов ЧС с возможностями беспилотных летательных аппаратов. Научная значимость исследования заключается в формировании комплексного подхода к интеграции беспилотных летательных аппаратов в систему управления силами и средствами при ЧС, что позволяет повысить эффективность координации и сократить неопределённость в процессе принятия решений. Новизна работы состоит в объединении кластерного анализа функций координации, типологизации беспилотных летательных аппаратов и математической модели выбора в единый управленческий инструментарий, что ранее не применялось в отечественных исследованиях по тематике ликвидации ЧС.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, координация, чрезвычайные ситуации, спасательные подразделения, управление, технологии, алгоритм выбора.

IMPROVING APPROACHES TO THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO COORDINATE THE ACTIVITIES OF UNITS INVOLVED IN EMERGENCY RESPONSE

S. Y. SHCHUKAREV, A. I. ZAKINCHAK

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: shukarev@mail.ru, zakinchak@mail.ru,

The aim of the study is to improve approaches to the use of unmanned aerial vehicles to coordinate the activities of units involved in emergency response, as well as to develop a formalized model for choosing the optimal types of unmanned aerial vehicles for solving various operational tasks. The research methods used are system analysis, structural and functional modeling, the clustering method of coordination mechanisms, as well as mathematical modeling in the form of a normalized weighted efficiency assessment and integer linear programming for optimal allocation of unmanned aerial vehicles with limited resources. The

analysis of domestic and foreign sources made it possible to evaluate modern practices of using unmanned aerial vehicles and identify key functional areas of their application. The main results of the study include the developed classification of mechanisms for coordinating the actions of rescue units using unmanned aerial vehicles, comparing their types with the tasks of emergency response, as well as the formation of a mathematical model for choosing the optimal device depending on the mission criteria. The paper also offers a table of typologization of unmanned aerial vehicles by key parameters and management advantages, as well as an improved decision-making algorithm that compares the needs of emergency responders with the capabilities of unmanned aerial vehicles. The scientific significance of the research lies in the formation of an integrated approach to the integration of unmanned aerial vehicles into the emergency management system, which makes it possible to increase coordination efficiency and reduce uncertainty in the decision-making process. The novelty of the work consists in combining cluster analysis of coordination functions, typologization of unmanned aerial vehicles and a mathematical model of choice into a single management toolkit, which has not previously been used in domestic research on emergency response.

Keywords: unmanned aerial vehicles, coordination, emergency situations, rescue units, management, technologies, selection algorithm.

Введение

Современные чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера характеризуются высокой динамичностью, пространственной распределённостью и значительным уровнем неопределённости, что существенно усложняет процесс управления силами и средствами. В этих условиях особую роль приобретают технические средства, обеспечивающие оперативное получение достоверной информации и поддержку принятия управленческих решений.

Беспилотные летательные аппараты в последние годы активно внедряются в практику ликвидации ЧС и используются для мониторинга обстановки, разведки, поиска пострадавших, обеспечения связи и доставки малых грузов. Однако, несмотря на расширение номенклатуры применяемых БПЛА и накопленный практический опыт, их использование в большинстве случаев носит фрагментарный характер и не опирается на формализованные модели выбора и распределения аппаратов в зависимости от задач, этапов и условий ликвидации ЧС.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что существующие работы преимущественно сосредоточены на технических характеристиках БПЛА, отдельных сценариях их применения или описании частных кейсов. При этом недостаточно разработаны управленческие модели, интегрирующие БПЛА в систему координации действий подразделений с учётом ограниченности ресурсов, приоритетов задач и временных факторов.

В связи с этим возникает научная проблема разработки формализованного подхода к применению БПЛА как элемента системы управления ликвидацией ЧС, обеспечивающего повышение эффективности координации и

снижение неопределённости при принятии решений.

Одним из главных направлений является использование БПЛА для быстрого и точного мониторинга территорий, подвергшихся воздействию негативных факторов [1,2]. Например, в случае природных катастроф (наводнений, лесных пожаров, землетрясений) БПЛА могут выполнять роль воздушных разведчиков, которые позволяют в кратчайшие сроки оценить масштабы ущерба, выявить угрозы и составить план действий для спасателей. Кроме того, БПЛА активно применяются для поиска пострадавших в условиях, когда наземные силы и средства не могут быстро перемещаться по местности. Использование дополнительных технических средств, таких как инфракрасная камера, тепловизор, лидар позволяет обнаруживать людей в условиях плохой видимости (ночью или в задымленной зоне).

Методы исследования

Исследование выполнено в рамках системного подхода и включает аналитический, классификационный и формализующий этапы. На первом этапе проведён анализ научных публикаций и практики применения БПЛА в условиях ЧС. На втором этапе выполнена кластеризация механизмов координации действий подразделений. На третьем этапе разработана математическая модель поддержки принятия управленческих решений.

Для выявления направлений и механизмов координации использованы методы системного и структурно-функционального анализа. Кластеризация механизмов координации выполнена по функциональному признаку (информационная, пространственно-временная, коммуникационная, тактическая и логистическая координация).

Для формализации процесса выбора БПЛА использована модель нормализованной взвешенной оценки. Пусть имеется набор типов БПЛА $i = 1, \dots, n$, для каждого из которых задан набор критериев $j = 1, \dots, m$.

Нормализация значений критериев осуществляется по формуле:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

Итоговая оценка эффективности БПЛА определяется как:

$$E_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot r_{ij}, \quad (2)$$

где w_j – вес критерия, отражающий его приоритет в конкретной задаче.

Для задач формирования группы БПЛА при ресурсных ограничениях используется целочисленная линейная оптимизация:

$$\max \sum_{i=1}^n E_i \cdot x_i \text{ при } \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \leq C, \quad (3)$$

где x_i – количество БПЛА типа i , c_i – ресурсная стоимость, C – допустимый ресурс.

Исследование направлено на совершенствование подходов к применению беспилотных летательных аппаратов для координации действий подразделений, участвующих в ликвидации чрезвычайных ситуаций. Кроме того, предполагается разработка структурированной модели, состоящей из последовательных этапов, для выбора наиболее подходящих типов БПЛА в зависимости от конкретных оперативных задач. Высокая мобильность, независимость от состояния земной поверхности делает их незаменимым источником получения информации о месте и размерах ЧС, что активно используется управленческим звеном для координации действий подразделений, задействованных в ликвидации ЧС. Кроме того, БПЛА может выполнять функции ретранслятора для систем связи, и при необходимости, выполнять транспортные задачи – доставлять небольшие грузы (медикаменты, средства связи). При этом, присутствуют существенные ограничения, связанные с использованием БПЛА в спасательных операциях: продолжительность полета, влияние метеоусловий (ветер, высота нижней границы облаков, горизонтальная видимость), радиус действия (ограничен дальностью, прямой видимостью оператора БПЛА) [3]. В качестве дополнительных ограничений можно рассматривать необходимость обучения управлению БПЛА, а также

недостаточный уровень интеграции в спасательную инфраструктуру.

Результаты

Чтобы БПЛА стали неотъемлемой частью работы спасательных подразделений, необходимо разработать единые стандарты и процедуры для их использования. Это поможет не только улучшить взаимодействие между различными подразделениями, но и снизить риски ошибок, связанных с недостаточной подготовленностью [4, 5]. Необходима разработка универсальных регламентов для координации использования БПЛА в условиях ЧС. Эти регламенты должны включать:

- единый регламент подготовки БПЛА для применения в различных ЧС, с учетом специфики ситуации (например, в лесных пожарах или в зоне наводнений);

- единые требования к подготовке операторов дронов: они должны быть обучены в соответствии с четкими стандартами безопасности и оперативного взаимодействия с другими службами;

- единые протоколы обмена информацией между операторами БПЛА и руководителями спасательных групп для обеспечения координации действий.

Кроме того, существует потребность в адаптации современных технологий, таких как использование алгоритмов искусственного интеллекта для анализа данных с БПЛА и автоматического принятия решений. Это может существенно повысить скорость реагирования и уменьшить нагрузку на оперативных сотрудников.

БПЛА могут быть оснащены системами искусственного интеллекта для:

- автоматической оценки масштабов разрушений: например, для определения степени повреждения инфраструктуры в результате землетрясений или ураганов;

- прогноза развития ситуации, влияющей на принятие решения или корректировку ранее принятого: например, для оценки угрозы расширения зоны лесного пожара или подтоплений.

Для успешной координации действий спасателей в условиях ЧС БПЛА могут быть использованы для создания единой ситуационной картины, которая будет включать данные о масштабах ЧС, оценке угроз, местоположении сил, наличии ресурсов и т.д. Это возможно реализовать только при создании комплексной программной платформы для сбора и обработки данных, поступающих от различных источников (БПЛА, спутники, наземные датчики и т.д.).

Платформа должна:

– обеспечивать визуализацию данных в реальном времени (близком к реальному), чтобы руководители различного уровня могли оперативно принимать решения на основе актуальной информации;

– интегрировать данные с других источников (например, метеорологические данные или данные о трафике) для получения более точной картины ситуации.

В условиях ЧС основными направлениями координации деятельности подразделений с помощью БПЛА являются следующие:

1. Пространственно-временная координация. В это направление можно включить такие задачи как проведение непрерывной аэровизуальной разведки, синхронизация перемещения подразделений, обновление оперативной обстановки в реальном времени, корректировка маршрутов групп и направления поисковых работ, а также контроль времени реакции подразделений.

2. Координация действий через ситуационную осведомленность. Это позволяет создать единое информационное пространство, провести интеграцию данных с разных сенсоров, детализировать зоны рисков и преград, очаги пожара, обеспечить точное позицио-

нирование спасателей на местности и фактическое расположение техники.

3. Коммуникационно-управленческая координация. Передача команд и указаний подразделениям в зонах, где связь нарушена, синхронизация межведомственных действий до формального начала совместной работы.

4. Координация данных в рамках анализа и прогнозирования. Автоматизация классификации зон приоритетов, моделирование развития обстановки, связанной с возможным распространением пожара, затоплением, обрушением (уточнение и проверка прогноза).

5. Tактическая координация на местности. Сопровождение подразделений спасателей по труднодоступной местности, определение безопасного маршрута, обеспечение видимости в трудных условиях.

6. Поддержка логистической координации. Обеспечение доставки малых грузов, сопровождение колонн с техникой, контроль работы инженерной техники.

Анализ направлений координации между различными подразделениями и функциями, обеспечиваемыми БПЛА позволил оценить использование БПЛА в зависимости от этапа и задач ликвидации ЧС (табл. 1).

Таблица 1. Классификация механизмов координации действий подразделений спасателей с использованием БПЛА

Механизм координации	Описание	Результат/Цель
Непрерывная аэровизуальная разведка	Обеспечивает бесперебойное обновление информации о происходящих событиях в реальном времени через видеокамеры, термальные сенсоры и лидары.	Позволяет спасателям адаптировать маршруты и действия в зависимости от изменения обстановки.
Обновление оперативной обстановки	БПЛА регулярно отправляют данные о текущем положении дел на командные пункты.	Быстрое реагирование на изменения ситуации и оперативные решения на всех уровнях.
Контроль времени реакции подразделений	Фиксация времени выхода, прибытия и выполнения задач подразделениями.	Уменьшение задержек в выполнении задач, повышение оперативности взаимодействия.
Создание единой карты бедствия	Генерация карты с отображением всех угроз (пожары, завалы, затопления), созданной на основе данных с БПЛА.	Обеспечение единого информационного поля для всех участников ликвидации ЧС.
Детализация зон риска	Использование БПЛА для точного анализа зон риска (пожары, загрязнения, разрушения).	Повышение точности принятия решений и планирования действий спасателей.
Обеспечение точного позиционирования спасателей	БПЛА в реальном времени отслеживают местоположение спасательных групп, техники и пострадавших.	Минимизация потерь времени на поисковые работы, повышение эффективности эвакуации.
Формирование воздушного ретранслятора связи	Использование БПЛА как мобильных ретрансляторов для обеспечения связи в зонах с поврежденной инфраструктурой.	Устранение прерываний в коммуникациях между подразделениями, эффективная передача команд.
Передача команд и указаний подразделениям	БПЛА доставляют команды и уточняющие данные оперативного характера непосредственно к подразделениям.	Обеспечение быстрого и точного исполнения приказов в реальном времени.
Координация межведомственных действий	Интеграция данных из различных служб для синхронизации действий: МЧС, МВД, пожарные, скорые.	Слаженная работа различных ведомств, повышение эффективности совместных операций.

Механизм координации	Описание	Результат/Цель
Автоматическая классификация зон приоритетов	Анализ данных с БПЛА для выделения зон, требующих срочной эвакуации или вмешательства.	Быстрое реагирование на наиболее критичные участки для спасения жизни и предотвращения дальнейших угроз.
Моделирование развития обстановки	Прогнозирование динамики ситуации с использованием данных с БПЛА (например, распространение пожара или затопления).	Ожидаемый прогноз позволяет заранее готовить соответствующие силы и средства для реагирования.
Поддержка принятия управленческих решений	Интеллектуальная обработка данных для предоставления управленцам рекомендаций по оптимальному выбору действий.	Повышение точности стратегических и тактических решений.
Наведение спасателей на цели	БПЛА помогает точно и безопасно направлять спасательные группы в труднодоступные или опасные места.	Уменьшение времени поиска и повышение безопасности спасателей.
Определение безопасных подходов	Обеспечение разведки для нахождения оптимальных и безопасных маршрутов для спасателей.	Уменьшение риска для спасателей, минимизация временных затрат на перемещения.
Обеспечение видимости в трудных условиях	Использование термальных и ночных сенсоров БПЛА для навигации в условиях низкой видимости (дым, темнота).	Успешное выполнение задач спасения в ночное время и при ограниченной видимости.
Поиск и идентификация пострадавших	Сканирование местности для выявления людей в зоне ЧС с последующей передачей их координат спасателям.	Повышение эффективности поисковых операций и ускорение спасения пострадавших.
Разработка маршрутов эвакуации	Выбор и планирование оптимальных маршрутов для эвакуации с учётом всех препятствий на пути.	Обеспечение безопасности эвакуации и минимизация времени перемещения людей.
Мониторинг колонн эвакуации	Постоянное отслеживание передвижения эвакуационных колонн для предотвращения пробок или задержек.	Координация движения, повышение скорости эвакуации и безопасность участников.
Обеспечение доставки малых грузов	Доставка медикаментов, инструментов и других необходимых ресурсов в труднодоступные районы с помощью БПЛА.	Ускорение поставок ресурсов в зону ЧС, улучшение логистики.
Оптимизация размещения ресурсов	Выбор мест для размещения спасательной техники и ресурсов на основе данных с БПЛА.	Обеспечение эффективного использования ограниченных ресурсов.
Контроль работы инженерной техники	Мониторинг работы техники, задействованной в расчистке завалов и восстановлении инфраструктуры.	Повышение эффективности работы техники и предотвращение сбоев в процессе ликвидации ЧС.
Оповещение о вторичных угрозах	С помощью БПЛА оперативно обнаруживаются новые угрозы (например, повторные обрушения или новые очаги пожара).	Уменьшение риска для спасателей, обеспечение своевременных мер безопасности.
Контроль состояния опасных объектов	Постоянное наблюдение за потенциально опасными объектами (например, резервуарами с химическими веществами, плотинами).	Предотвращение дальнейших разрушений или катастроф.
Создание безопасных коридоров движения	Выбор и обозначение безопасных маршрутов для спасательных подразделений, учитывая угрозы на местности.	Уменьшение времени, необходимого для безопасного перемещения спасателей и техники.
Планирование зон поиска	Разделение территорий на секторы для выполнения поисковых операций.	Повышение эффективности поиска пострадавших, сокращение времени реагирования.
Автоматизированное выявление следов жизнедеятельности	Использование алгоритмов искусственного интеллекта для автоматического обнаружения признаков жизни (например, движение, температура).	Повышение точности и скорости поиска живых людей в зоне ЧС.
Поддержка ночных и круглосуточных операций	Возможности ночного наблюдения и мониторинга с помощью БПЛА с термальными камерами.	Успешное выполнение поисково-спасательных операций в ночное время, при дыме или в условиях низкой видимости.

Структурирование и анализ процессов управления силами и средствами в чрезвычайных ситуациях с применением БПЛА позволяет оценить, какие аспекты процесса управления требуют внимания. Кроме того, можно оценить

какой потенциал несет применение оптимального вида беспилотного летательного аппарата. Разделение по блокам позволяет точнее выделить приоритетные зоны для улучшения координации. Например, если проблемы

возникают в обеспечении безопасности спасателей, это будет видно по блоку, связанному с контролем вторичных угроз и безопасных коридоров, и можно будет предложить решения с использованием БПЛА для этого сегмента.

Анализ публикаций [5, 6, 7, 8, 9], описывающих практику применения БПЛА в процессе

выполнения задач в условиях ЧС, позволил сопоставить отдельные задачи с типом БПЛА, целесообразным для применения, а также выявить управленческие преимущества этого выбора (табл. 2).

Таблица 2. Типологизация БПЛА в зависимости от выполняемых задач

Задача	Оптимальные типы БПЛА	Ключевые характеристики БПЛА	Управленческие преимущества применения
Первичная разведка и оценка обстановки	<ul style="list-style-type: none"> • Квадрокоптеры • VTOL (вертикальный взлёт/посадка) 	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрая подготовка к вылету (1–3 мин) • Высокая манёвренность • Возможность зависания • Наличие тепловизоров и широкоугольных камер 	<ul style="list-style-type: none"> • Молниеносное получение данных для решения о вводе сил и средств • Снижение неопределённости для руководителя ликвидации ЧС
Детализированное картографирование зоны ЧС	<ul style="list-style-type: none"> • Крылатые (самолетного типа) БПЛА • Долгосрочные наблюдательные платформы 	<ul style="list-style-type: none"> • Большая дальность (20–120 км) • Длительность полёта 2–8 ч • Высокоточное фотограмметрическое оборудование 	<ul style="list-style-type: none"> • Получение точных карт для построения маршрутов спасателей • Возможность прогнозирования динамики опасных факторов
Мониторинг развития ситуации (динамика огня, воды, газа)	<ul style="list-style-type: none"> • Мультикоптеры среднего класса • Гибриды (VTOL + крыло) 	<ul style="list-style-type: none"> • Среднее время полёта (40–90 мин) • Тепловизионные и мультимодальные датчики • Возможность циклических облётов 	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечение непрерывной ситуационной осведомлённости штаба • Повышение точности прогноза поведения опасных факторов
Координация групп на земле	<ul style="list-style-type: none"> • Квадрокоптеры с прямой передачей данных • Малогабаритные тактические БПЛА 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая высота работы (10–50 м) • Высокая манёвренность • Передача видеопотока в режиме реального времени • Возможность сброса радиомаяков 	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность визуального ведения спасательных групп • Соединение разрозненных подразделений в единую информационную сеть
Поиск людей	<ul style="list-style-type: none"> • Мультикоптеры с ИК-камерой • Нанодроны для обследования помещений 	<ul style="list-style-type: none"> • Инфракрасная и ультрафиолетовая съёмка • Полёты в труднодоступных местах • Миниатюрные размеры (нанодронов) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ускорение поиска пострадавших • Снижение риска для спасателей при обследовании опасных конструкций
Доставка оборудования и медикаментов	<ul style="list-style-type: none"> • Средние и тяжёлые мультикоптеры • Грузовые БПЛА 	<ul style="list-style-type: none"> • Грузоподъёмность 3–50 кг • Автономная навигация • Стабильность при ветре 	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрая доставка средств первой необходимости • Компенсация недоступности маршрутов наземного транспорта
Связь и ретрансляция	<ul style="list-style-type: none"> • Высотные мультикоптеры • БПЛА-аэростаты • Длительного зависания 	<ul style="list-style-type: none"> • Способность находиться в воздухе 3–10 ч • Радиоретрансляторы и mesh-модули 	<ul style="list-style-type: none"> • Создание временной сети связи на месте ЧС • Обеспечение устойчивой связи между подразделениями
Оценка вторичного ущерба и финальный контроль	<ul style="list-style-type: none"> • Квадрокоптеры • Крылатые БПЛА с HD-съёмкой 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокое разрешение камер • Повторяемость маршрутов (для сравнения снимков) 	<ul style="list-style-type: none"> • Документирование эффективности ликвидации ЧС • Аналитика для управленческих решений и отчётности

Для эффективного выбора БПЛА для решения определенной задачи, зачастую необходимо принимать решения в условиях ограниченности времени и материальных ресурсов. Нами предлагается математический алгоритм, который может быть реализован в виде

программного модуля для поддержки принятия решений в любой среде программирования. Отдельные элементы выбора можно формализовать в виде уже известных характеристик БПЛА, которые имеются на вооружении в

подразделениях, задействованных в зоне ЧС, а другие вводятся специалистами самостоятельно.

Математический алгоритм выбора БПЛА, адаптирован под управленческую задачу оптимального принятия решений при распределении сил и средств в ЧС. Обозначения и критерии модели:

Пусть имеется набор типов/моделей БПЛА $i \in I = \{1, \dots, n\}$. Для каждого i задаются m критериев $j \in J = \{1, \dots, m\}$.

Нами предлагаются следующие критерии (список может быть расширен, при необходимости):

c_{i1} – дальность / продолжительность полёта (выносливость);

c_{i2} – полезная нагрузка (грузоподъёмность);

c_{i3} – качество сенсоров (камера, лидар);

c_{i4} – время развёртывания / готовности;

$$\tilde{c}_{ij} = \begin{cases} \frac{c_{ij} - \min_k c_{kj}}{\max_k c_{kj} - \min_k c_{kj}}, & \text{если } j - \text{«чем больше, тем лучше» (преимущества)} \\ \frac{\max_k c_{kj} - c_{ij}}{\max_k c_{kj} - \min_k c_{kj}}, & \text{если } j - \text{«чем меньше, тем лучше» (стоимость, затраты)} \end{cases} \quad (4)$$

Кроме того, в ситуации, когда $\max = \min$, положим $\tilde{c}_{ij} = 1$ для всех i .

Итоговая оценка для одного типа БПЛА определяется как взвешенная сумма (количественный показатель):

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \tilde{c}_{ij}, S_i \in [0,1]. \quad (5)$$

Интерпретация: чем больше S_i , тем лучше модель i удовлетворяет требованиям к задаче.

$$\begin{aligned} \max_{x_i} U &= \sum_{i \in I} S_i \cdot x_i \\ \sum_{i \in I} cost_i \cdot x_i &\leq B (\text{бюджет/ресурс}) \\ x_i &\in \mathbb{Z}_{\geq 0} \text{ (или } x_i \in \{0,1\}) \\ &\text{и дополнительные ограничения:} \\ \sum_{i \in I} x_i &\geq N_{\min} \text{ (минимально требуемое число БПЛА)} \\ x_i &\leq avail_i \text{ (ограничение наличия, при необходимости)} \end{aligned} \quad (6)$$

Фактически, решается задача целочисленного линейного программирования; на выходе будет сформирован состав группы БПЛА, максимизирующий суммарную эффективность.

Если существует отдельное требование к временным параметрам и развёртыванию

c_{i5} – устойчивость к погоде;

c_{i6} – стоимость единицы (запасные элементы, ремонт);

c_{i7} – требуемая квалификация оператора / доступность.

Руководитель ликвидации ЧС задаёт веса приоритетов $w_j \geq 0, \sum_{j=1}^m w_j = 1$. Вес отражает приоритет одного параметра над другим (например, в ночном поиске приоритет показателей качества сенсоров и устойчивости к погоде выше).

Кроме того, при наработке большого объема статистических данных, можно воспользоваться сценарным подходом, когда для аналогичной задачи и условий, которые ранее встречались будет предложен аналогичный набор приоритетов.

Критерии нормализуются в интервал $[0,1]$. Для критерия j определяем:

Если задача выполнима для одной единицы БПЛА, тогда выбором будет БПЛА с максимальным значением.

Если необходимо собрать комплекс из нескольких БПЛА, тогда необходимо дополнить условия рядом параметров и ограничений. Пусть $x_i \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ – число единиц типа i в задаче (или $x_i \in \{0,1\}$ при выборе только одного), $cost_i$ – полная стоимость единицы (или «операционный ресурс» – время, человеко-час и т.п.), и бюджета/ресурса B . Целевая задача – максимизировать суммарную «полезность» нескольких БПЛА при ресурсном ограничении:

БПЛА добавим параметр t_i – время развёртывания (в минутах). Тогда полезность можно скорректировать с учётом срочности – ввести фактор времени срочности $\alpha \in [0,1]$ (чем ближе к 1 – тем более важна скорость):

$$S'_i = (1 - \alpha)S_i + \alpha \left(1 - \frac{t_i - \min_k t_k}{\max_k t_k - \min_k t_k}\right). \quad (7)$$

Альтернативно – вводится штраф в целевой функции: $U = \sum_i (S_i - \beta \hat{t}_i) x_i$, где \hat{t}_i – нормализованное время, β – коэффициент чувствительности.

Кроме того, с учетом особенностей и разнообразия БПЛА возможно учесть совместимость и интероперабельность. Задаём бинарную матрицу совместимости $M_{ij} = 1$, если тип i совместим с системой/платформой/ПЦ, иначе 0. Тогда вводим ограничения:

$$x_i \leq M_i^{\text{sys}} \cdot \text{avail}_i, \quad (8)$$

Таким образом, алгоритм выбора БПЛА будет состоять из следующих шагов:

1. Определить критерии j , релевантные задаче (высокая скорость/ночной поиск/доставка грузов и т.п.).

2. Задать веса w_j (с помощью экспертов штаба ликвидации ЧС, ситуационной модели или простым ранжированием).

3. Собрать параметры c_{ij} для доступных моделей i (время полёта, груз, стоимость, время готовности, и т.д.).

4. Нормализовать значения по формуле (1).

5. Вычислить S_i (или скорректированные S'_i с учётом времени/интероперабельности).

6. Задать ограничения (бюджет B , минимальное/максимальное число аппаратов N_{\min}, N_{\max} , доступность).

7. Найти максимальное значение $\sum S_i x_i$ при требуемых ограничениях.

К основным преимуществам предлагаемой модели можно отнести прозрачность и адаптивность. Предполагается, что модель может быть адаптирована к существующим алгоритмам принятия решений, например стать дополнением системы определения потребности в БПЛА в рамках ликвидации крупномасштабных ландшафтных пожаров [10]. Модель предоставляет чёткие и количественно обоснованные решения для выбора БПЛА, что важно для принятия управленческих решений в условиях ЧС. Модель гибко адаптируется под разные задачи и сценарии ЧС, позволяя учитывать различные критерии и изменяющиеся условия.

Обсуждение

Полученные в ходе исследования результаты развивают и дополняют существующие научные представления о применении беспилотных летательных аппаратов в процессе

ликвидации чрезвычайных ситуаций, смещая акцент с преимущественно технического и описательного анализа к формализованному управленческому подходу.

Использование предлагаемой модели в практической деятельности аварийно-спасательных подразделений целесообразно в виде программного продукта с доступом к базе данных о предыдущих операциях. Это позволит использовать опыт установки критериев значимости отдельных характеристик БПЛА для выполнения определенных задач. Кроме того, проведение работ по заранее известному алгоритму позволит спланировать применение разных типов БПЛА в разные моменты времени.

Отдельного внимания заслуживает вопрос терминологической неоднородности, связанной с использованием понятий «беспилотный летательный аппарат», «беспилотное воздушное судно» и «беспилотная авиационная система». В научных публикациях и нормативных документах данные термины нередко используются как синонимы, что приводит к методологической неопределённости при анализе и сопоставлении результатов исследований. Так, в ряде работ акцент делается преимущественно на техническом устройстве летательного аппарата (БПЛА), тогда как в других исследованиях рассматривается более широкий контур, включающий наземные станции управления, каналы связи, программное обеспечение и операторов, что соответствует понятию беспилотной авиационной системы (БАС) [1, 2].

С управленческой точки зрения подобное различие является принципиальным, поскольку эффективность координации действий подразделений при ликвидации ЧС определяется не только характеристиками самого летательного аппарата, но и возможностями всей системы в целом – устойчивостью каналов связи, интеграцией с информационными платформами, уровнем автоматизации обработки данных и подготовленностью персонала. В ряде исследований, посвящённых применению БПЛА в условиях ЧС, данные аспекты рассматриваются фрагментарно либо остаются за пределами анализа [3, 8], что ограничивает практическую применимость полученных выводов.

В рамках настоящего исследования термин «беспилотный летательный аппарат» используется для обозначения конкретного технического средства, выполняющего полёт без пилота на борту, тогда как понятие «беспилотная авиационная система» применяется при рассмотрении задач координации и управления, предполагающих взаимодействие БПЛА с операторами, средствами связи и системами поддержки принятия решений. Такое разграничение терминов позволяет повысить точность

научного анализа и более корректно интерпретировать результаты моделирования при решении управленческих задач ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Применение подобного подхода позволит оптимизировать ресурсы, но при этом требует рассмотрения ключевых процессов, в которых применяются БПЛА, и технологий, которые обеспечивают их работу.

Текущие алгоритмы мониторинга с использованием БПЛА в ЧС обычно включают стандартные процедуры съемки в реальном времени и передачу данных в центр управления. На основе полученных изображений или видео проводится первичная оценка ситуации (например, повреждения инфраструктуры, зоны наводнений, распространение огня при лесных пожарах). В рамках этого процесса БПЛА выполняют предварительную разведку, передавая видеоизображения или фото в реальном времени. Оператор анализирует полученные данные, принимает решение о следующем шаге. В настоящее время применяется базовая обработка данных (например, фокусировка на горячих точках для пожаров с использованием термальных камер). Она сильно зависит от анализа, который проводит человек. При этом оператор должен вручную анализировать большие объемы данных, что занимает много времени. Кроме того, обычные БПЛА, как правило, имеют ограниченный радиус действия, что требует частых возвращений для подзарядки. В этой связи критические параметры математической модели будут связаны с длительностью полета и точностью сенсоров.

Новые алгоритмы и технологии могут существенно улучшить эффективность применения БПЛА в ЧС. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации обработки данных, получаемых с БПЛА. Алгоритм автоматического анализа изображений и видео может автоматически выделять объекты интереса, такие как поврежденные здания, пострадавших людей или очаги возгорания. Системы на базе ИИ могут анализировать визуальные данные быстрее и точнее, чем человек. Вместо того чтобы полагаться только на термальные камеры, можно использовать ИИ для анализа движения объектов и формирования вероятностных моделей для более точного поиска людей в условиях ЧС. Это приведет к снижению нагрузки на оператора, так как алгоритмы ИИ могут автоматически фильтровать и анализировать данные, ускоряя процесс принятия решений. Помимо этого, ИИ будет более точным в различении объектов, таких как человек, животное или объект, что особенно важно в ситуации

с поиском людей. Это позволит сместить акцент в выборе приоритетных показателей работы БПЛА на другие характеристики.

Заключение

Полученные в ходе исследования результаты развивают и дополняют существующие научные представления о применении беспилотных летательных аппаратов в процессе ликвидации чрезвычайных ситуаций, смещая акцент с преимущественно технического и описательного анализа к формализованному управленческому подходу.

Предложенный в настоящей работе подход ориентирован на системное использование БПЛА для обеспечения различных механизмов координации – пространственно-временной, информационной, коммуникационной, тактической и логистической. Разработанная классификация механизмов координации позволяет связать конкретные функции БПЛА с управленческими задачами и этапами ликвидации ЧС, что создаёт основу для более осознанного и обоснованного использования данных технических средств.

Особого внимания заслуживает предложенная математическая модель выбора БПЛА. В работах, посвящённых формированию групп беспилотных летательных аппаратов [4], основное внимание уделяется вопросам надёжности и технической совместимости, тогда как управленческий аспект выбора БПЛА в зависимости от задач и приоритетов практически не формализуется. В представленной модели данный недостаток частично устранён за счёт использования нормализованной взвешенной оценки и целочисленного линейного программирования, что позволяет учитывать как качественные, так и количественные критерии эффективности.

Следует отметить, что практическая применимость предложенной модели во многом зависит от корректности задания весовых коэффициентов критериев. Данный аспект предполагает участие экспертов штаба ликвидации ЧС либо использование накопленных статистических данных о предыдущих операциях. Аналогичные ограничения отмечаются и в исследованиях, посвящённых системам поддержки принятия решений в условиях ЧС [10], что указывает на общую методологическую проблему формализации управленческих решений в условиях неопределённости.

Перспективным направлением развития предложенного подхода является интеграция алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, что соответствует современным тенденциям развития систем дистанционного мониторинга и анализа данных [9]. Использование ИИ может позволить

автоматизировать формирование приоритетов критериев, повысить точность прогнозирования развития обстановки и снизить нагрузку на лиц, принимающих решения.

В целом, результаты исследования подтверждают целесообразность перехода от эпизодического применения БПЛА к их системной интеграции в контур управления ликвидацией

чрезвычайных ситуаций. Предложенный подход может рассматриваться как методологическая основа для разработки программных модулей поддержки принятия решений и формирования единых регламентов применения БПЛА в деятельности аварийно-спасательных подразделений.

Список литературы

1. Соколов А. П., Ермолаев В. Е., Худайназаров Ю. К. Назначение, цели, задачи и область применения комплексов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, их классификация // Телекоммуникации и связь. 2025. № 1(4). С. 34–43. DOI 10.21681/3034-4050-2025-1-34-43.

2. Костин А. С. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика. 2019. № 1(19). С. 70–80.

3. Гетманцев А. Ю. Классификация показателей эффективности контроля безопасности испытаний и эксплуатации беспилотных воздушных судов (беспилотных летательных аппаратов) // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 94–104.

4. Росс Г. В., Гатауллин Т. М., Гатауллин С. Т. Алгоритм повышения надежности при формировании групп беспилотных летательных аппаратов // Анализ, Моделирование, Управление, Развитие социально-экономических систем (АМУР-2025): сборник научных трудов XIX Международной школы-симпозиума АМУР-2025. Симферополь: Индивидуальный предприниматель Корниенко Андрей Анатольевич. С. 331–334.

5. Синюков М. Ф., Воронцов С. В. Исследование современных подходов к международному гуманитарному реагированию на чрезвычайные ситуации в сфере экстремального туризма // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 91–110. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.88.45.009.

6. Мальцева Е. И., Романова Е. Ф. Беспилотные летательные аппараты: преимущества и недостатки // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: сборник XIII Международной научно-практической конференции. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2025. С. 108–111.

7. Инновационные технологии для медицинского обеспечения пострадавших в нештатных и аварийных ситуациях в условиях Арктики / А. В. Поляков, Е. А. Ильин, В. М. Усов [и др.] // Авиакосмическая и экологическая

медицина. 2020. Т. 54, № 2. С. 5–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-5-21.

8. Место и роль беспилотной авиации при ликвидации чрезвычайных ситуаций: опыт зарубежных стран / С. П. Мосов, С. М. Салий, Т. Д. Чубина [и др.] // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2021. № 2 (117). С. 136–151. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-117-2-136-151.

9. Технологии дистанционного мониторинга крупных пожаров с использованием беспилотных авиационных систем / А. В. Кузнецов, Н. Г. Топольский, М. О. Баканов [и др.]. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. 124 с.

10. Model of cyclical monitoring and managing of large-scale fires and emergencies for evaluation of the required number of unmanned aircraft systems / D. V. Tarakanov, V. Prajova, M. O. Bakanov [et al.]. MM Science Journal, 2020, vol. 2020, No. October, pp. 4040–4044. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_10_2020059.

References

1. Sokolov A. P., Ermolaev V. E., Khudaynazarov Yu. K. Naznachenie, tseli, zadachi i oblast primeneniya kompleksov malorazmernykh bespilotnykh letatelnykh apparatov, ikh klassifikatsiya [Purpose, goals, objectives and scope of application of small-sized unmanned aerial vehicle complexes, their classification]. *Telekommunikatsii i svyaz'*, 2025, vol. 1 (4), pp. 34–43. DOI: 10.21681/3034-4050-2025-1-34-43

2. Kostin A. S. Klassifikatsiya grazhdanskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov i sfery ikh primeneniya [Classification of civil unmanned aerial vehicles and their areas of application]. *Sistemnyy analiz i logistika*, 2019, vol. 1 (19), pp. 70–80.

3. Getmantsev A. Yu. Klassifikatsiya pokazateley effektivnosti kontrolya bezopasnosti ispytaniy i ekspluatatsii bespilotnykh vozdushnykh sudov (bespilotnykh letatel'nykh apparatov) [Classification of indicators of effectiveness of safety control of tests and operation of unmanned aerial vehicles (unmanned aerial vehicles)]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, vol. 1 (65), pp. 94–104.

4. Ross G. V., Gataullin T. M., Gataullin S. T. Algoritm povysheniya nadezhnosti pri formirovaniy grupp bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Algorithm for increasing reliability when forming groups of unmanned aerial vehicles]. *Analiz, Modelirovaniye, Upravleniye, Razvitiye sotsial'no-ekonomicheskikh sistem (AMUR-2025)*. Simferopol': Individual'Individual'nyy predprinimatel' Kornienko Andrey Anatol'evich, 2025, pp. 331–334.

5. Sinyukov M. F., Vorontsov S. V. Issledovanie sovremennykh podkhodov k mezhdunarodnomu gumanitarnomu reagirovaniyu na chrezvychaynye situatsii v sfere ekstremalnogo turizma [A study of modern approaches to international humanitarian response to emergency situations in the field of extreme tourism]. *Sibirskiy pozharno-spatel'nyy vestnik*, 2025, vol. 3 (38), pp. 91–110. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.88.45.009

6. Maltseva E. I., Romanova E. F. Bespilotnye letatelnye apparaty: preimushchestva i nedostatki [Unmanned aerial vehicles: advantages and disadvantages]. Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie APK, sostoyanie i perspektivy razvitiya. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. P. A. Stolypina, 2025, pp. 108–111.

7. Innovatsionnye tekhnologii dlya meditsinskogo obespecheniya postradavshikh v neshtatnykh i aviarynykh situatsiyakh v usloviyakh

Arktiki [Innovative technologies for medical care of victims in emergency and accident situations in the Arctic] / A. V. Polyakov, E. A. Ilin, V. M. Usov [et al.]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2020, vol. 54, issue 2, pp. 5–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-5-21

8. Mesto i rol bespilotnoy aviatsii pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy: opyt zarubezhnykh stran [The place and role of unmanned aviation in emergency response: experience of foreign countries] / S. P. Mosov, S. M. Saliy, T. D. Chubina, [et al.]. *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpaeva*, 2021, vol. 2 (117), pp. 136–151. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-117-2-136-151

9. *Texnologii distancionnogo monitoringa krupnykh pozharov s ispolzovaniem bespilotnykh aviacionnykh sistem* [Technologies for remote monitoring of large fires using unmanned aircraft systems] A. V. Kuzneczov, N. G. Topolskiy, M. O. Bakanov [et al.]. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2020, 124 p.

10. Model of cyclical monitoring and managing of large-scale fires and emergencies for evaluation of the required number of unmanned aircraft systems / D. V. Tarakanov, V. Prajova, M. O. Bakanov [et al.]. *MM Science Journal*, 2020, vol. 2020, No. October, pp. 4040–4044. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_10_2020059.

Щукарев Сергей Юрьевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой основ экономики функционирования РСЧС

E-mail: shukarev@mail.ru

Shchukarev Sergey Yurievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of historical sciences, associate professor, head of the Department of Fundamentals of Economics

of the Functioning of the Russian Emergencies Ministry

E-mail: shukarev@mail.ru

Закинчак Андрей Игоревич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат экономических наук, доцент кафедры основ экономики функционирования РСЧС

E-mail: zakinchak@mail.ru

Zakinchak Andrey Igorevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of economics sciences, associate professor of the Department of Fundamentals of Economics of

the Functioning of the Russian Emergencies Ministry

E-mail: zakinchak@mail.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

К рассмотрению принимаются рукописи в электронном формате документа MicrosoftWord (*.doc, *.docx). Файлы высылаются по адресу: journal@edufire37.ru

Статьи должны полностью соответствовать специализациям журнала.

Обязательно указание места работы всех авторов, их должностей и контактной информации.

В статье указывается шифр основной специальности, по которой выполнена работа.

При направлении материалов в редакцию по электронной почте в одном письме направляются:

- файл статьи в формате MS Word;
- внешняя рецензия, заверенная в установленном в организации порядке (рецензенты и авторы статей не должны находиться в должностных отношениях);
- сканированная копия сопроводительного письма.
- экспертное заключение о возможности открытой публикации материалов в журнале;

ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ

Обязательные элементы рукописи:

УДК, аннотация, ключевые слова, текст статьи.

Аннотация должна иметь объем 150–200 слов, а её содержание – отражать структуру статьи.

Минимальный объем ключевых слов – 5. Ключевые слова отделяются друг от друга точкой с запятой.

В структуру статьи должны входить: введение (краткое), цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, список литературы.

Структура размещения статьи в журнале:

- Блок 1 – на русском языке: УДК; название статьи; автор(ы); адресные данные авторов (полное юридическое название организации, адрес организации, адрес электронной почты всех или одного автора); аннотация; ключевые слова;
- Блок 2 – транслитерация и перевод на английский язык соответствующих данных Блока 1 в той же последовательности: название статьи – на английском языке; авторы – на латинице (транслитерация); название организации, адрес организации, аннотация, ключевые слова – на английском языке;
- Блок 3 – полный текст статьи на языке оригинала (русском), оформленный в соответствии с действующими требованиями Журнала;
- Блок 4 – список литературы на русском языке (название «Список литературы»);
- Блок 5 – список литературы в романском алфавите (название References). Если список литературы состоит только из англоязычных источников, то Блок 5 может отсутствовать.
- Блок 6 – сведения об авторах на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению

Рукописи представляются в формате А4. Объем представляемых рукописей (с учетом пробелов):

- статьи – до 20 тысяч знаков;
- обзора – до 60 тысяч знаков;
- краткого сообщения – до 10 тысяч знаков.

Оформление текста статьи:

- для набора используется шрифт Arial, размер шрифта – 10;
- отступ первой строки абзаца 1,25 см;
- все поля 2 см;
- все аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом использовании;
- недопустимо использование расставленных вручную переносов.

Оформление формул, рисунков и таблиц:

• формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 или Math Type 5.0-6.0 Equation (шрифт Arial), размер шрифта – 10. Пояснения к формулам (экспликация) должны быть набраны в подбор (без использования красной строки). Формулы нумеруют в круглых скобках по правому краю страницы;

- в тексте статьи обязательно должны содержаться ссылки на таблицы, рисунки, графики;
- графики, рисунки и фотографии монтируются в тексте после первого упоминания о них. Количество графического материала должно быть минимальным (не более 5 рисунков). Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы, оси на графиках подписаны. Рисунки и фотографии следует

представлять в черно-белом варианте; они должны иметь хороший контраст и разрешение. Рисунки в виде ксерокопий из книг и журналов, а также плохо отсканированные не принимаются. Рисунки обязательно должны быть сгруппированы (т.е. не должны «разваливаться» при перемещении и форматировании);

- подрисовочные подписи размещаются по центру;
- названия рисунков даются под ними после слова «Рис.» с порядковым номером. Слово «Рис.» с порядковым номером пишется полужирно, название рисунка – с прописной буквы, обычным шрифтом: **Рис. 1.** Отдельные элементы дымопроницаемой мембраны в сложенном состоянии;
- если рисунок в тексте один, номер не ставится: **Рисунок.** Статистика пожаров, произошедших на различных объектах;
- подрисовочные подписи не входят в состав рисунка, а располагаются отдельным текстом под иллюстрацией. Если на рисунке вводятся новые (ранее не встречавшиеся в тексте) обозначения, они должны быть расшифрованы в подрисовочной подписи; также здесь поясняются элементы, обозначенные на рисунке цифрами. Рекомендуемая ширина рисунков не более 7,5 см;
- ссылки в тексте на таблицы пишутся: «табл.», «табл. 1»;
- слово «Таблица» с порядковым номером и названием размещается по центру. Слово «Таблица» набирается курсивом, название таблицы выделяется полужирно: **Таблица 1. Экспериментальные данные по допустимым срокам непрерывной продолжительности работы в изолирующих термоагрессивостойких костюмах для пожарных;**
- единственная в статье таблица не нумеруется: **Таблица. Анализ оборудования для задачи воздушно-механической пены;**
- по возможности следует избегать использования рисунков и таблиц, размер которых требует альбомной ориентации страницы;
- поворот рисунков и таблиц в вертикальную ориентацию недопустим;
- текст статьи не должен заканчиваться таблицей, рисунком или формулой.

Правила оформления списка литературы

После текста статьи приводится список литературы, оформленный в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

Источники указываются в порядке цитирования в тексте. На все источники из списка литературы должны быть ссылки в тексте.

В список литературы включаются только научные и приравненные к ним публикации (статьи, монографии, учебные издания, патенты на изобретения, авторские свидетельства). Ссылки на нормативные документы (законы, постановления, стандарты) должны оформляться как подстрочные сноски.

В статье должны быть представлены два варианта списка использованной литературы:

– список на русском языке. Для изданий на русском языке обязательна транслитерация оригинального названия и перевод названия на английский язык (в квадратных скобках); тире, а также символ // в описании на английском языке не используются;

– список в романском алфавите (References). В References при переводе статьи на английский названия изданий и журналов не переводятся, используется транслитерация.

Для изданий на английском языке транслитерация не производится.

Если есть, обязательно указывается DOI.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
№ 1 (58), 2026

16+

Дата выхода в свет 27.03.2026 г. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат 60 × 90 1/8. Усл. печ. л. 14,5. Тираж 100 экз.
Заказ № 224. Цена свободная

Оригинал-макет подготовлен
Ивановской пожарно-спасательной академией ГПС МЧС России
АДРЕС РЕДАКЦИИ (ИЗДАТЕЛЯ): 153040, г. Иваново, проспект Строителей, д. 33;
тел.: (4932) 93-08-00, доб. 1560; e-mail: journal@edufire37.ru

Отпечатано в АО «Информатика»
153032, г. Иваново, ул. Ташкентская, 90