

ISSN 2218–130X

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
«Вестник Санкт-Петербургского
университета ГПС МЧС России»

Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service
of EMERCOM of Russia

№ 2 – 2026

Редакционный совет	
Матвеев А.В. <i>Председатель</i>	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Ложкин В.Н.	д.т.н., проф., засл. деят. науки Рос. Федерации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Калач А.В.	д.х.н., проф., Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний России, г. Воронеж, Россия
Мокрозуб В.Г.	д.т.н., проф., член-корреспондент РАЕН, почет. работник Высш. проф. обр. Рос. Федерации, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия
Кубасов И.А.	д.т.н., доц., Академия управления МВД России, Москва, Россия
Маторин С.И.	д.т.н., проф., Белгородский университет кооперации, экономики и права, г. Белгород, Россия
Минаков В.Ф.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия
Рыбаков А.В.	д.т.н., проф., Академия гражданской защиты МЧС России, Москва, Россия
Буйневич М.В.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия
Сатыбалдина Д.Ж.	к.ф-м.н., доц., Евразийский национальный университет им. Л.Г. Гумилева, г. Нур-Султан, Республика Казахстан
Дворников С.В.	д.т.н., проф., Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия
Израилов К.Е.	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
Булдакова Т.И.	д.т.н., проф., Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Тиамийу О.А.	к.т.н., Государственный университет, г. Илорина, Нигерия
Ивахнюк Г.К.	д.х.н., проф., лауреат премии Правительства Рос. Федерации в обл. науки и техники, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия
Барбин Н.М.	д.т.н., проф., Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия
Гончаренко И.А.	д.ф-м.н., проф., Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь
Богданова В.В.	д.х.н., проф., Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия	
Зыбина О.А. <i>Председатель</i>	д.т.н., доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
Онов В.А. <i>Заместитель председателя</i>	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский филиал Российской таможенной академии, Санкт-Петербург, Россия
Терехин С.Н.	д.т.н., доц. Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Евдокимов В.И.	д.мед.н., проф., Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Ложкина О.В.	д.т.н., к.х.н., проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
Максимов А.В. <i>Секретарь</i>	к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Editorial council	
Matveev A.V. <i>Chairman</i>	PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Lozhkin B.N.	DSc, prof., honored activity science Russian Federations, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Kalach A.V.	DSc, prof., Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia
Mokrozub V.G.	DSc, prof., corresponding member of the Russian academy of natural sciences, honor. Higher worker prof. arr. Russian Federation, Tambov state technical university, Tambov, Russia
Kubasov I.A.	DSc, associate prof., Academy of management of the Ministry of internal affairs of Russia, Moscow, Russia
Matorin S.I.	DSc, prof., Belgorod university of cooperation, economics and law, Belgorod, Russia
Minakov V.F.	DSc, prof., Saint-Petersburg state university of economics, Saint-Petersburg, Russia
Rybakov A.V.	DSc, prof., Academy of civil protection of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
Buynevich M.V.	DSc, prof., Saint-Petersburg university of telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruevich, Saint-Petersburg, Russia
Satybaldina D.Zh.	PhD, associate prof., Eurasian national university L.G. Gumilyov, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan
Dvornikov S.V.	DSc, prof., Military academy of communications. Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia
Izrailov K.E.	PhD, associate prof., Saint-Petersburg Federal research center of the Russian academy of sciences, Saint-Petersburg, Russia
Buldakova T.I.	DSc, prof., Moscow state technical university (national research university) named after N.E. Bauman, Moscow, Russia
Thiamiyu O.A.	PhD, State university, Ilorina, Nigeria
Ivakhnyuk G.K.	DSc, prof., laureate of the Government prize Russian Federation in the region science and technology, Saint-Petersburg state technological institute (technical university), Saint-Petersburg, Russia
Barbin N.M.	DSc, prof., Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia
Goncharenko I.A.	DSc, prof., University of civil protection of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Bogdanova V.V.	DSc, prof., University of civil protection of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Editorial board	
Zybina O.A. <i>Chairman</i>	DSc, associate prof., Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university, Saint-Petersburg, Russia
Onov V.A. <i>Deputy chairman</i>	PhD, associate prof., Saint-Petersburg branch of the Russian customs academy, Saint-Petersburg, Russia
Terekhin S.N.	DSc, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Evdokimov V.I.	DSc, prof., All-Russian center for emergency and radiation medicine A.M. Nikiforov of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Lozhkina O.V.	DSc, PhD, prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Maksimov A.V. <i>Secretary</i>	PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Евдокимов В.И., Порошин А.А., Сибирко В.И. Тренды формирования обстановки с пожарами с учетом типов населенных пунктов и субъектов России с 2015 по 2024 г.	1
Хафизов И.Ф., Султанов Р.М., Бикмеев В.И., Бакиров Д.Р. Моделирование процесса образования коррозии в трубопроводном транспорте как фактор повышения пожарной опасности. .	13
Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах железнодорожного транспорта.	20
Полунин Г.А., Таваров С.Ш. Моделирование тепловых процессов при аварийных режимах перегрузки в городских распределительных сетях.	31
Джафарова А.А., Маер О.М., Матвеев А.В. Анализ проблем эвакуации при пожарах из ночных клубов.	40

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Ройзен А.М., Мусиенко Т.В. Инновационная организационная культура как антиэнтропийный механизм организации: от элитарной модели управления к распределённой когнитивной архитектуре.	50
Грызунов В.В., Лемихов И.В. Архитектура интеллектуального и объяснимого анализа рисков для контроля после выпуска товаров.	65
Лукоянов А.А., Rogozin Е.А., Rogozin Р.Е., Калач А.В. Методика формирования показателя защищенности автоматизированных информационных систем.	82
Максимова Е.А., Утешева Г.Ш., Громов Ю.Ю., Карасев П.И., Стародубов К.В. Функция присутствия как механизм корректной обработки пропущенных значений в нечётком интеллектуальном анализе данных.	92
Израилов К.Е. Способы расчета информационного объема форм-содержательных представлений программы.	104
Саратова Т.Е., Апухтин А.М. Анализ архитектурных компонентов мультиагентных систем.	111
Акапьев В.Л., Борисенко А.В., Новикова Е.А. К вопросу о классификации информационно-коммуникационных технологий, используемых в правоохранительной деятельности.	120
Саратова Т.Е., Воронцова Е.К. Анализ средств и подходов идентификации связей между компонентами образовательных программ.	137

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Естехин В.Г. Методика применения огнетушителей на объектах водного транспорта.	146
Пылаева Е.А. Влияние астраленов на огнестойкость и прочностные характеристики бетона в условиях углеводородного пожара.	161
Матвеев А.С. Верификация количественных результатов мероприятий национальных проектов на основе больших языковых моделей.	171

CONTENTS

FIRE AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Evdokimov V.I., Poroshin A.A., Sibirko V.I. Trends in the formation of the fire situation, taking into account the types of settlements and subjects of Russia from 2015 to 2024.	1
Hafizov I.F., Sultanov R.M., Bikmeev V.I., Bakirov D.R. Modeling of corrosion formation in pipeline transport as a factor of increased fire hazard.	13
Samigullin G.H., Tregub N.A. Assessment of the probability of fire escalation at railway transport facilities.	20
Polunin G.A., Tavarov S.Sh. Modeling of thermal processes during emergency overload conditions in urban distribution networks.	31
Dzhafarova A.A., Maer O.M., Matveev A.V. The analysis of nightclub fire evacuation problems. ..	40

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Royzen A.M., Musienko T.V. Innovative organizational culture as an anti-entropy mechanism of organization: from an elite management model to a distributed cognitive architecture.	50
Gryzunov V.V., Lemikhov I.V. Architecture of intelligent and explainable risk analysis for post-release customs control.	65
Lukoyanov A.A., Rogozin E.A., Rogozin R.E., Kalach A.V. Methodology for developing a security index for automated information systems.	82
Maximova E.A., Utesheva G.Sh., Gromov Y.Yu., Karasev P.I., Starodubov K.V. Presence function as a mechanism for correct handling of missing values in fuzzy data mining.	92
Izrailov K.E. Methods for calculating the information volume of form-content presentations of the program.	104
Saratova T.E., Apuhtin A.M. Analysis of architectural components of multi-agent systems.	111
Akapyev V.L., Borisenko A.V., Novikova E.A. On the classification of information and communication technologies used in law enforcement activities.	120
Saratova T.E., Vorontsova E.K. Analysis of means and approaches for identifying relations between components of educational programs.	137

WORKS OF YOUNG SCIENTISTS

Estekhin V.G. Methodology for the application of fire extinguishers at water transport facilities.	146
Pylaeva E.A. The effect of astralenes on the fire resistance and strength characteristics of concrete in a hydrocarbon fire.	161
Matveev A.S. Verification of quantitative results of national project activities based on large language models.	171

ПОЖАРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Аналитическая статья

УДК 614.84:31 (470); DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-1-12

ТРЕНДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ С ПОЖАРАМИ С УЧЕТОМ ТИПОВ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И СУБЪЕКТОВ РОССИИ С 2015 ПО 2024 г.

✉Евдокимов Владимир Иванович.

ВЦЭРМ им. А.М. Никиторова МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Порошин Александр Алексеевич;

Сибирко Виталий Иванович.

ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, Московская область, Россия

✉9334616@mail.ru

Аннотация. С 2019 г. изменился статистический учет пожаров в России. Как и в учетных системах зарубежных стран, загорания стали входить в число пожаров, что существенно изменило пожарные риски.

Цель – изучить региональные показатели пожаров в России за 10 лет (2015–2024 гг.) с учетом загораний, которые будут способствовать повышению безопасности на пожарах.

Данные по пожарам в России, в том числе в городах и сельской местности, получены из Федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных "Пожары"». Определен среднегодовой показатель пожаров, приходящийся на 10 тыс. человек населения России, городов и сельской местности. Рассчитаны высокие, средние и низкие уровни распространенности пожаров. Отличия данных определены по непараметрическому U-критерию Манна-Уитни. Развитие показателей оценивалось с помощью анализа динамических рядов и расчета полиномиального тренда 2-го порядка.

Среднегодовой показатель пожаров в России был больше среднемирового в 3,5 раза. Уровень распространенности пожаров в городах оказался в 2,2 раза меньше, чем в сельской местности ($p < 0,001$), притом что население в городах было в 2,9 раза больше. Рассчитаны количественные и качественные региональные среднегодовые показатели пожаров в России, в том числе в городах и сельской местности.

Сравнение социальных последствий на пожарах по регионам России выявляет факторы риска, минимизация которых будет способствовать повышению безопасности на пожарах.

Ключевые слова: пожар, статистика, регион России, город, сельская местность, МЧС России

Для цитирования: Евдокимов В.И., Порошин А.А., Сибирко В.И. Тренды формирования обстановки с пожарами с учетом типов населенных пунктов и субъектов России с 2015 по 2024 г // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 1–12. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-1-12

Analytical article

TRENDS IN THE FORMATION OF THE FIRE SITUATION, TAKING INTO ACCOUNT THE TYPES OF SETTLEMENTS AND SUBJECTS OF RUSSIA FROM 2015 TO 2024

✉Evdokimov Vladimir I.

ARCERM, EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Poroshin Alexander A.;

Sibirko Vitaly I.

VNIPO of EMERCOM of Russia, Balashikha, Moscow region, Russia

✉9334616@mail.ru

Abstract. Introduction. Since 2019, the statistical accounting of fires in Russia has changed. As in the accounting systems of foreign countries, fires began to be included in the number of fires, which significantly changed the fire risks.

The aim is to study regional fire indicators in Russia for 10 years (2015–2024), taking into account fires that will contribute to improving fire safety.

Data on fires in Russia, including in urban and rural areas, was obtained from the Federal State Information System «Federal data bank Pozhary». We determined the average annual rate of fires per 10 thousand people in Russia, cities and rural areas. High, medium, and low fire prevalence levels were calculated. Differences in the data were determined by the nonparametric Mann-Whitney U-test. The development of indicators was evaluated by analyzing dynamic series and calculating a polynomial trend of the 2nd order.

The average annual rate of fires in Russia was 3,5 times higher than the global average. The prevalence of fires in urban areas was 2,2 times lower than in rural areas ($p < 0,001$), while the population in urban areas was 2,9 times higher. Quantitative and qualitative regional average annual indicators of fires in Russia, including in urban and rural areas, are calculated.

A comparison of the social consequences of fires across Russian regions reveals risk factors that can be minimized to improve fire safety.

Keywords: fire, statistics, region of Russia, city, rural area, EMERCOM of Russia

For citation: Evdokimov V.I., Poroshin A.A., Sibirko V.I. Trends in the formation of the fire situation, taking into account the types of settlements and subjects of Russia from 2015 to 2024 // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 1–12. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-1-12

Введение

Пожар – неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства [1]. По данным Центра пожарной статистики (Centre of Fire Statistics, CFS) Международной ассоциации пожарно-спасательных служб (International Association of Fire and Rescue Services, CTIF) [2, 3], в мире ежегодно возникают около 6–7 млн пожаров, притом что при сборе данных о пожарах и деятельности пожарно-спасательных служб в государствах исторически сложились принципиально разные правила учета пожаров и их последствий. Обзор терминологии и статистических методов сбора данных о пожарах в странах Европейского союза подробно представлены в статьях М. Manes и др. [4, 5].

Среднегодовой показатель пожаров, приходящийся на 1 000 чел. населения мира с 2018 по 2022 г., составил 0,83 или $0,83 \cdot 10^{-3}$ пожар/(чел. · год), уровень смертности на пожарах в расчете на 100 тыс. чел. – $0,88 \cdot 10^{-5}$ смертей/(чел. · год), травмирования людей в мире на пожарах – $3,48 \cdot 10^{-5}$ травм/(пожар · год) [3].

По данным сайта «Глобальное бремя болезней» Всемирной организации здравоохранения, на рис. 1 изображена инфограмма гибели людей на пожарах и от ожогов в расчете на 100 тыс. чел. населения по странам мира.

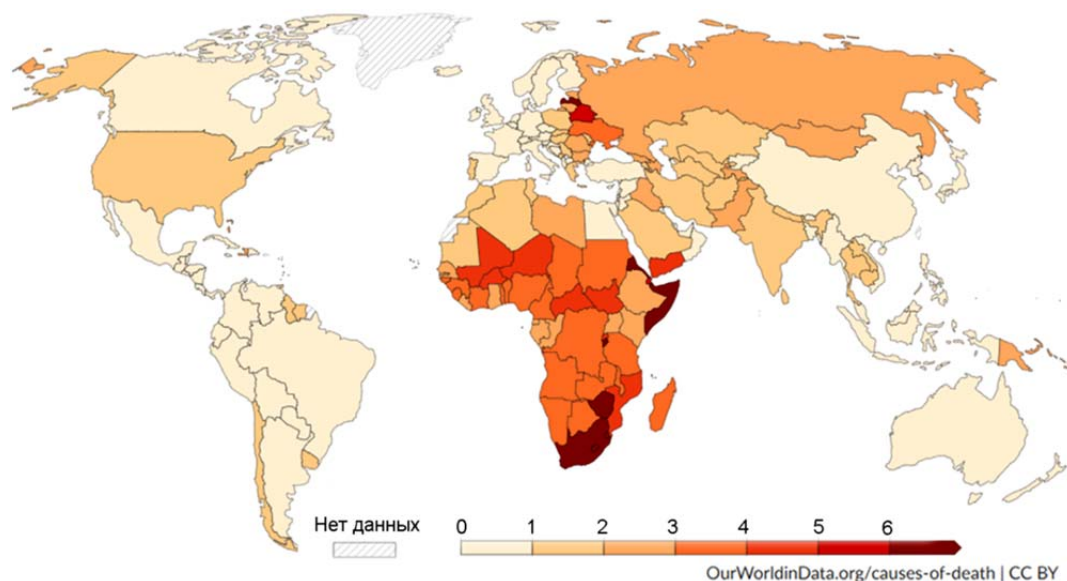


Рис. 1. Инфограмма смертности населения на 100 тыс. чел. на пожарах и от ожогов в мире в 2021 г.

Как правило, в странах с большим количеством населения и его высокой плотностью отмечается значительное число погибших на пожарах. Однако при расчете уровня погибших высокие данные выявляются в республиках Балтии, Беларуси, в Украине и государствах Африки (рис. 1). Например, с 2012 по 2021 г. в Китае среднегодовой показатель гибели населения на пожарах составил 10,5 тыс. чел., смертность при расчете на 100 тыс. чел. населения – $0,75 \cdot 10^{-5}$ гибель/(чел. · год), в США – 2,9 тыс. и $0,88 \cdot 10^{-5}$, в Беларуси – 0,6 тыс. и $6,35 \cdot 10^{-5}$ соответственно.

Сравнение отечественных социальных последствий на пожарах с показателями в мире выявляет факторы риска, минимизация которых будет способствовать повышению безопасности на пожарах.

Цель – изучить региональные показатели пожаров в России за 10 лет (2015–2024 гг.).

Методы исследования

Данные по пожарам в России, в том числе в городах и сельской местности, получили из Федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных "Пожары"» и информационно-аналитических сборников «Пожары и пожарная безопасность ...» [6].

С 2019 г. изменился статистический учет пожаров и их последствий в России [7]. Как и в учетных системах зарубежных стран загорания стали входить в число пожаров. Увеличение суммы пожаров и загораний изменило показатели пожарных рисков [8–10]. В отличие от официальных сборников [6], в показатели пожаров в 2015–2018 гг. число загораний включено ретроспективно.

Определен среднегодовой показатель пожаров, приходящийся на 10 тыс. чел. населения России или $n \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год). Численность населения в России и регионах, в том числе в городах и сельской местности, получена в годовых статистических указателях [11], содержащихся на официальном сайте Росстата, притом что сведения на 1 января текущего года считались на 31 декабря предыдущего года.

Статистическая обработка полученных сведений осуществлялась с применением электронных таблиц Microsoft Excel 2007 и методик в программе Statistica 12.0. В ряде случаев распределение показателей по критерию Колмогорова-Смирнова отличалось от нормального, в связи с чем ограничили расчет среднегодовых показателей по сумме абсолютных данных за 10 лет. При установлении сходств (различий) данных использован непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Конгруэнтность (согласованность) трендов определена по коэффициенту корреляции (r) Пирсона.

Качественная оценка негативных последствий пожаров проведена по способу, представленному в государственных докладах «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [12]:

- оптимальная (зеленый цвет светофора) – средние значения более чем на $\frac{1}{3}$ меньше средней величины в России;
- приемлемая (допустимая, желтый цвет) – средние значения отличаются не более чем на $\frac{1}{3}$ от среднего показателя;
- неприемлемая (недопустимая, красный цвет) – средние значения отличаются больше чем на $\frac{1}{3}$ от средней величины в стране.

Развитие показателей оценивалось с помощью анализа динамических рядов и расчета полиномиального тренда 2-го порядка [13]. Коэффициент детерминации (R^2) показывал связь построенного тренда с полученными данными, чем больше был R^2 (максимальный – 1,0, пороговый – 0,5), тем он лучше приближался к реально наблюдавшимся показателям.

Результаты исследования и их обсуждение

Среднегодовой показатель пожаров с загораниями в России за 10 лет составил 426,8 тыс., в том числе в городах – 243,6 тыс. (57,1 %), в сельской местности – 183,2 тыс. (42,9 %). Количество пожаров в сельской местности было меньше в 1,3 раза, чем в городах, притом что в сельской местности число населения оказалось меньше в 2,9 раза. При разных по значимости коэффициентах детерминации полиномиальные тренды демонстрируют уменьшение числа пожаров в России (рис. 2А), в том числе в городах и сельской местности (рис. 2Б). В динамике выявлено увеличение доли пожаров в сельской местности (рис. 2В), например, если в 2015 г. доля пожаров в общей структуре составляла 40,5 %, то в 2024 г. – уже 46 %.

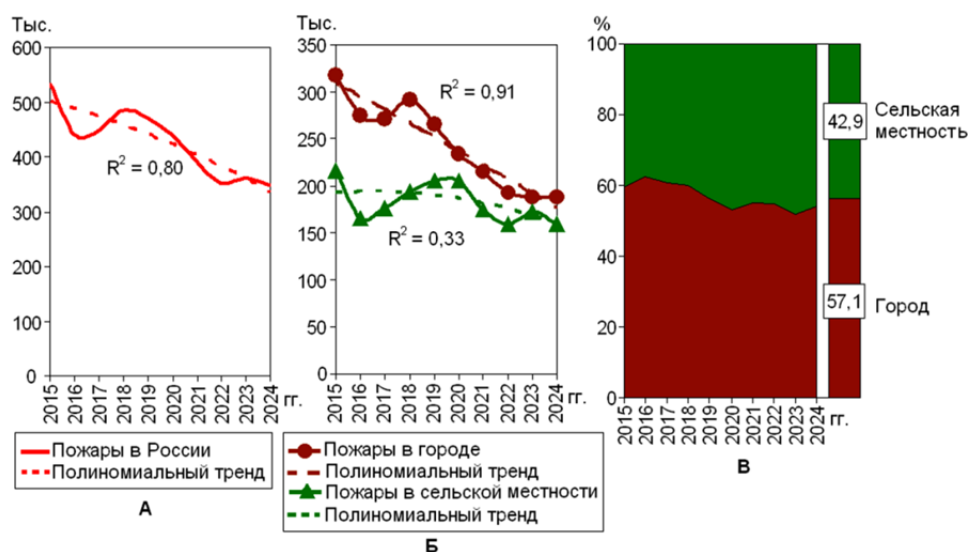


Рис. 2. Динамика количества пожаров в России (А), городах и сельской местности (Б), структура динамики (В)

Частота возникновения пожаров по часам суток за 10 лет в России представлена на рис. 3А. Среднегодовая доля возникновения пожаров ночью составила 13,6 %, утром – 16,2 %, днем – 40,1 %, вечером – 30,2 %. Полиномиальный тренд долей пожаров при высоком коэффициенте детерминации напоминает инвертированную U-кривую с максимальными показателями в дневное время с 14:00 до 17:59 ч и уменьшением данных ночью (рис. 3А).

С 2022 г. изменились электронные программы по статистической отчетности о пожарах, в связи с чем данные за 10 лет можно использовать с 2012 по 2021 г. Среднегодовая доля пожаров по дням недели за 10 лет составляла около 14,3 %. Полиномиальный тренд при высоком коэффициенте детерминации показывает увеличение доли пожаров в выходные дни (рис. 3Б). Отмечается вклад в увеличение пожаров так называемого человеческого фактора, например, в субботу доля пожаров была 15,5 %, в воскресенье – 15,8 %.

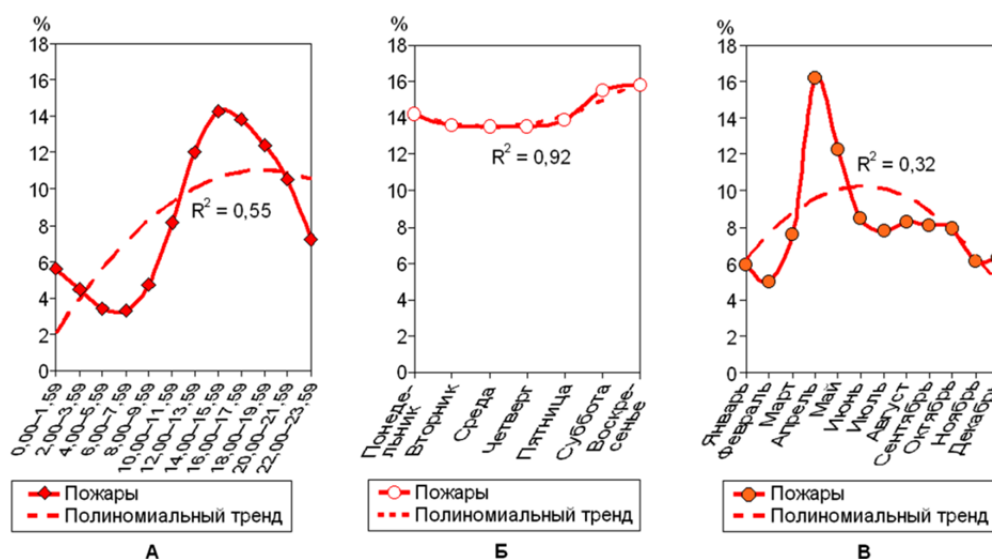


Рис. 3. Распространенность пожаров в России за 10 лет по часам суток (А), дням недели (Б) и месяцам года (В)

Среднегодовая доля пожаров по времени года за 10 лет составляла зимой 17,2 %, весной – 36,1 %, летом – 24,6 %, осенью – 22,1 %. Отмечается выраженная динамика долей по месяцам года, например, в январе она была 5,9 %, в апреле – 16,2 %, в мае – 12,4 %. Полиномиальный тренд ежемесячной структуры пожаров при низком коэффициенте детерминации демонстрирует инвертированную U-кривую с максимальными показателями в апреле – мае (рис. 3В), что связано с повышенной температурой воздуха, высокими рисками загорания сухой растительности, чему способствуют также сжигание травы на приусадебных участках, непотушенные костры при выезде на природу населения и пр.

Следует указать, что рассчитанная структура возникновения пожаров по часам суток, дням недели и месяцам года не отличается от проведенных ранее исследований и представляет собой устоявшуюся многолетнюю тенденцию развития пожаров в России.

Как уже было указано ранее, среднемировой показатель пожаров, приходящихся (2018–2021 гг.), оказался $8,3 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год) [3]. Среднегодовой показатель пожаров в России (2015–2024 гг.) был больше среднемирового в 3,5 раза и составил $29,1 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год). Показатель распространенности пожаров в городах оказался в 2,2 раза меньше, чем в сельской местности, – $22,3 \cdot 10^{-4}$ и $49,3 \cdot 10^{-4}$ чел./(пожар · год) соответственно ($p < 0,001$). При разных по значимости коэффициентах детерминации полиномиальные тренды демонстрируют уменьшение показателей уровня пожаров в России (рис. 4А), в том числе в городах и сельской местности (рис. 4Б).

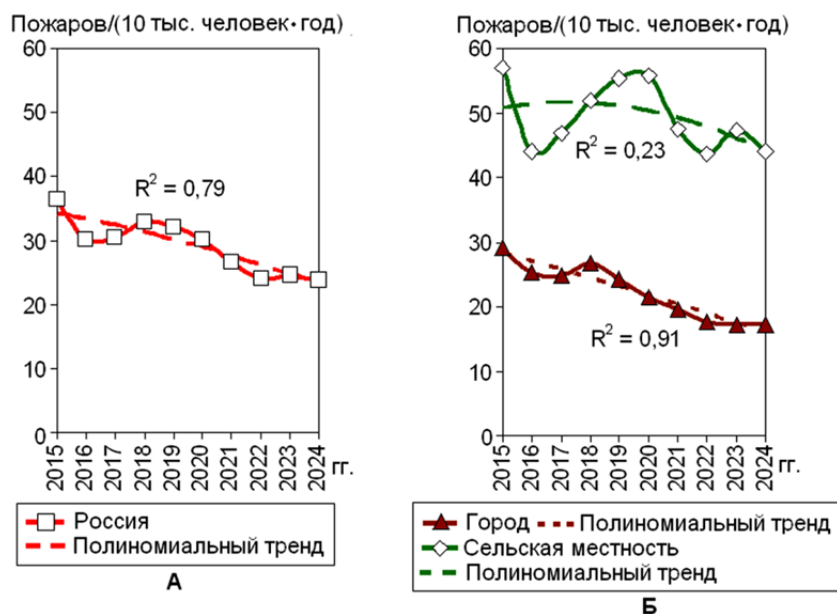


Рис. 4. Динамика количества пожаров, приходящихся на 10 тыс. человек населения, в России (А), городах и сельской местности (Б)

Региональные показатели пожаров. Среднегодовой уровень пожаров был $29,1 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год). Низкий уровень составил $19,4 \cdot 10^{-4}$ и менее, средний – в диапазоне от $19,5 \cdot 10^{-4}$ до $38,7 \cdot 10^{-4}$, высокий – $38,8 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год) и более.

На рис. 5 показана инфограмма уровня пожаров в регионах России. Высокие уровни пожаров были в Дальневосточном федеральном округе (ФО) и 27 регионах России, низкие – в Северо-Кавказском ФО и 16 регионах, средние – в остальных ФО и 42 регионах. Конкретные показатели уровня пожаров в расчете на 10 тыс. чел. населения в регионах России представлены в таблице.

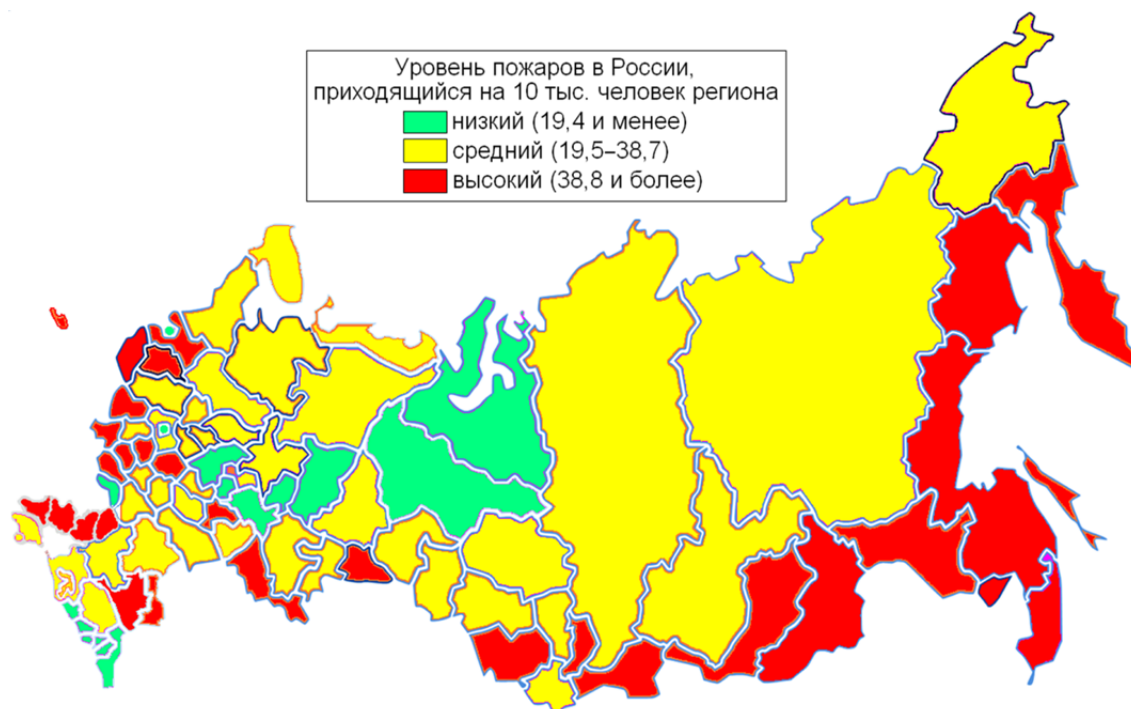


Рис. 5. Уровень пожаров (2015–2024 гг.) в регионах России

Таблица

Уровень пожаров в расчете на 10 тыс. человек населения в регионах России (2015–2024 гг.)

низкий		средний		высокий	
--------	--	---------	--	---------	--

Регион	Регион	Город	Сельская местность
РОССИЯ	29,1	22,3	49,3
Центральный федеральный округ	24,6	15,5	66,4
Белгородская область	14,3	9,7	23,4
Брянская область	40,9	29,4	67,6
Владимирская область	27,8	19,9	55,6
Воронежская область	29,6	16,1	57,8
Ивановская область	33,6	25,7	68,3
Калужская область	34,8	20,0	81,3
Костромская область	22,2	17,2	35,2
Курская область	39,0	22,2	74,5
Липецкая область	34,9	23,6	55,0
Московская область	31,3	19,5	81,6
Орловская область	48,1	26,8	90,7
Рязанская область	40,6	21,1	90,0
Смоленская область	39,8	23,7	81,4
Тамбовская область	34,4	22,1	53,3
Тверская область	34,3	23,6	67,8
Тульская область	42,6	26,9	88,5
Ярославская область	27,3	17,8	69,1
Москва	7,2	7,2	
Северо-Западный федеральный округ	29,4	22,9	64,6
Республика Карелия	30,7	24,3	56,5
Республика Коми	17,3	13,7	29,7
Ненецкий автономный округ	21,6	17,9	31,6
Архангельская область	23,1	16,3	46,8
Вологодская область	22,9	17,6	36,5
Калининградская область	39,6	32,9	62,6
Ленинградская область	43,8	26,8	75,5
Мурманская область	37,7	37,3	42,5
Новгородская область	39,7	25,3	75,5
Псковская область	63,7	33,4	137,0
Санкт-Петербург	20,5	20,5	
Южный федеральный округ	31,1	24,9	41,5
Республика Адыгея	31,6	22,6	39,8
Республика Калмыкия	60,7	71,7	51,5
Республика Крым	23,8	23,9	23,6
Краснодарский край	25,2	17,8	34,4
Астраханская область	52,3	47,5	61,7
Волгоградская область	37,0	25,5	75,3
Ростовская область	26,2	21,1	36,9
г. Севастополь	29,1	27,5	49,0
Северо-Кавказский федеральный округ	17,5	14,0	20,9
Республика Дагестан	9,7	11,0	8,7
Республика Ингушетия	6,0	6,2	5,8
Кабардино-Балкарская Республика	19,1	18,3	19,9
Карачаево-Черкесская Республика	12,5	10,2	14,1
Республика Северная Осетия – Алания	19,3	15,0	26,8
Чеченская Республика	8,5	9,5	8,0
Ставропольский край	32,4	18,0	53,1

Регион	Регион	Город	Сельская местность
Приволжский федеральный округ	23,7	17,9	38,7
Республика Башкортостан	25,3	20,9	32,4
Республика Марий Эл	20,4	15,8	29,4
Республика Мордовия	33,3	16,3	61,8
Республика Татарстан	14,5	11,1	25,5
Удмуртская Республика	15,6	12,0	22,5
Чувашская Республика – Чувашия	14,0	11,0	18,9
Пермский край	17,7	14,4	27,7
Кировская область	21,8	19,1	30,9
Нижегородская область	15,1	10,3	33,7
Оренбургская область	39,1	34,0	46,9
Пензенская область	22,4	13,9	40,7
Самарская область	28,6	19,4	65,6
Саратовская область	36,1	29,5	56,6
Ульяновская область	40,4	27,8	78,9
Уральский федеральный округ	28,0	22,4	52,4
Курганская область	46,4	38,7	59,0
Свердловская область	23,9	20,1	45,3
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	14,9	12,6	43,4
Ямало-Ненецкий автономный округ	18,3	16,0	30,4
Тюменская область	32,5	22,3	52,7
Челябинская область	34,5	28,8	61,5
Сибирский федеральный округ	34,8	28,1	53,2
Республика Алтай	22,6	19,7	23,7
Республика Тыва	42,2	56,4	25,2
Республика Хакасия	41,2	33,5	58,5
Алтайский край	52,1	40,3	67,4
Красноярский край	38,1	30,4	64,8
Иркутская область	31,8	28,7	43,5
Кемеровская область – Кузбасс	36,3	34,4	47,6
Новосибирская область	36,5	23,6	85,4
Омская область	35,5	26,0	60,7
Томская область	27,6	21,4	43,7
Дальневосточный федеральный округ	69,3	62,8	88,6
Республика Бурятия	47,7	44,3	52,7
Республика Саха (Якутия)	31,3	35,8	22,5
Забайкальский край	67,8	69,0	65,1
Камчатский край	44,7	35,2	78,6
Приморский край	65,5	57,4	93,1
Хабаровский край	64,5	58,7	91,7
Амурская область	61,2	52,8	78,7
Магаданская область	68,2	66,7	100,8
Сахалинская область	49,6	42,5	82,1
Еврейская автономная область	92,0	76,0	127,8
Чукотский автономный округ	31,5	35,7	21,7
Донецкая Народная Республика	56,47		
Луганская Народная Республика	56,07		
Запорожская область	64,80		
Херсонская область	39,59		

Очень высокие среднегодовые уровни пожаров в России оказались в Еврейской автономной обл. – $92,0 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), Магаданской обл. – $68,2 \cdot 10^{-4}$, Забайкальском крае – $67,8 \cdot 10^{-4}$, Приморском крае – $65,5 \cdot 10^{-4}$, Хабаровском крае – $64,5 \cdot 10^{-4}$, Псковской обл. – $63,7 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год).

Данные за 2023–2024 гг. на вновь присоединенных территориях свидетельствуют о высоком уровне пожаров, например, уровень пожаров в Запорожской обл. составил $64,8 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), Донецкой Народной Республике – $56,5 \cdot 10^{-4}$, Луганской Народной Республике – $56,1 \cdot 10^{-4}$, Херсонской обл. – $39,6 \cdot 10^{-4}$. Помимо причин возникновения пожаров, которые учитываются в повседневной деятельности, в этих регионах пожары дополнительно возникали в результате факторов военного характера (артиллерийских и ракетных обстрелов, детонаций боекомплектов, мин, сброса с беспилотных летательных аппаратов взрывоопасных предметов и пр.) [14].

Уровень пожаров в городах (2015–2024 гг.) был $22,3 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), в том числе, низкий уровень составил $14,9 \cdot 10^{-4}$ и менее, средний – от $15,0$ до $29,6 \cdot 10^{-4}$, высокий – $29,7 \cdot 10^{-4}$ и более.

На рис. 6 показана инфограмма уровня пожаров в городах. Высокие уровни пожаров были в Дальневосточном ФО и 23 регионах России, низкие – в Северо-Кавказском ФО и 14 регионах, средние – в остальных ФО и 48 регионах. Конкретные показатели уровня пожаров в расчете на 10 тыс. чел. населения в городах регионов России представлены в таблице.

Очень высокие среднегодовые уровни пожаров в городах России оказались в Еврейской автономной обл. – $76,0 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), Республике Калмыкия – $71,7 \cdot 10^{-4}$, Забайкальском крае – $69,0 \cdot 10^{-4}$, Магаданской обл. – $66,7 \cdot 10^{-4}$.

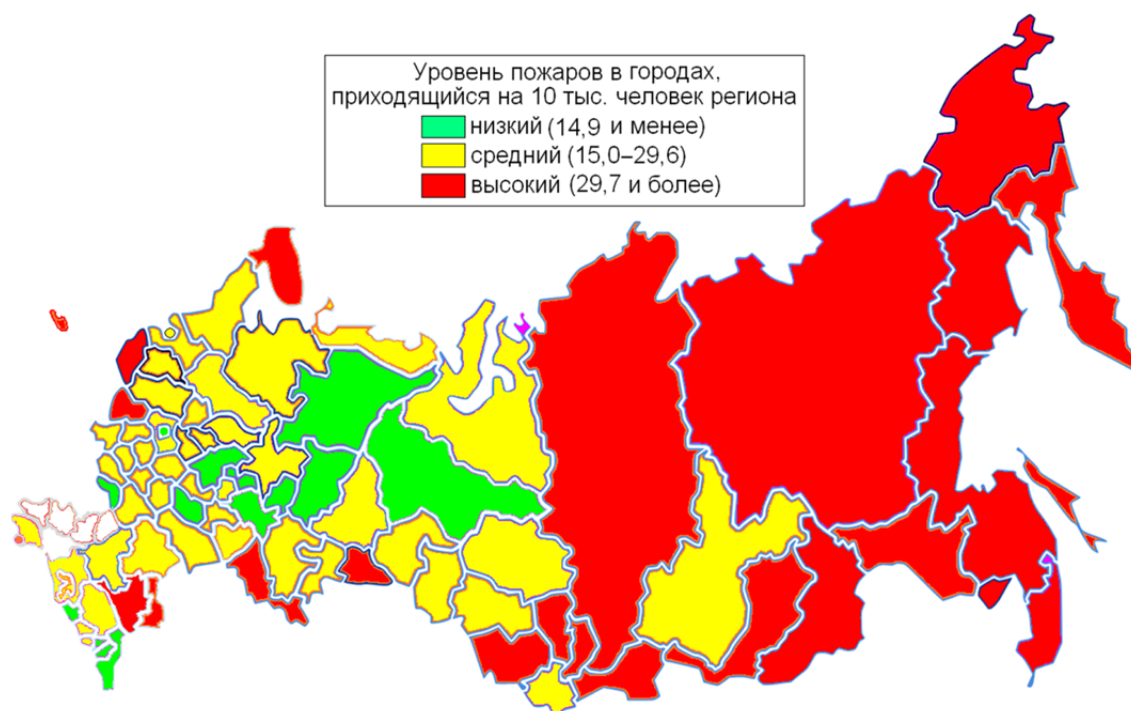


Рис. 6. Уровень пожаров (2015–2024 гг.) в городах России

Уровень пожаров в сельской местности (2015–2024 гг.) был $49,3 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), в том числе низкий уровень оказался $32,9 \cdot 10^{-4}$, средний – $33,0$ – $65,6 \cdot 10^{-4}$, высокий – $65,7 \cdot 10^{-4}$ и более.

На рис. 7 показана инфограмма уровня пожаров в сельской местности. Высокие уровни пожаров были в Центральном ФО, Дальневосточном ФО и 23 регионах России, низкие – в Северо-Кавказском ФО и 22 регионах, средние – в остальных ФО и 36 регионах. Конкретные показатели уровня пожаров в расчете на 10 тыс. чел. населения в сельской местности регионов России представлены в таблице.

Очень высокие среднегодовые уровни пожаров в сельской местности регионов России были в Псковской обл. – $137,0 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), Еврейской автономной обл. – $127,8 \cdot 10^{-4}$, Магаданской обл. – $100,8 \cdot 10^{-4}$, Приморском крае – $93,1 \cdot 10^{-4}$ и Хабаровском крае – $91,7 \cdot 10^{-4}$.

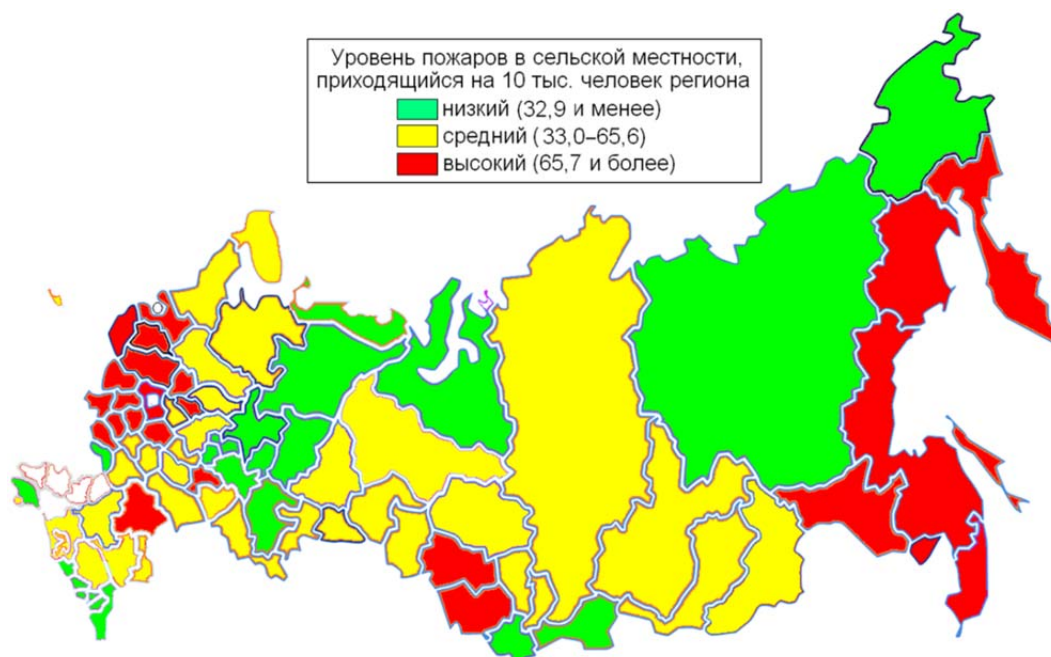


Рис. 7. Уровень пожаров (2015–2024 гг.) в сельской местности России

Заключение

По данным Федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных "Пожары"» среднегодовой показатель пожаров с загораниями за 10 лет с 2015 по 2024 г. в России составил 426,8 тыс. пожаров, в том числе, в городах – 243,7 тыс. (57,1 %), в сельской местности – 183,2 тыс. (42,9 %). Отмечается динамика уменьшения числа пожаров, притом что выявлено увеличение доли пожаров в сельской местности.

Среднемировой показатель пожаров в расчете на 10 тыс. населения в мире был $8,3 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год), в России этот показатель оказался больше в 3,5 раза – $29,1 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год). В городах среднегодовой показатель, соотнесенный с 10 тыс. человек, был меньше 2,2 раза, чем в сельской местности, – $22,3 \cdot 10^{-4}$ и $49,3 \cdot 10^{-4}$ пожар/(чел. · год) соответственно ($p < 0,001$). Выявлена динамика уменьшения уровня пожаров.

Сравнение социальных последствий на пожарах по регионам России, в том числе в городах и сельской местности выявляет факторы риска, минимизация которых будет способствовать повышению безопасности на пожарах.

Список источников

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. World Fire Statistics. Center of Fire Statistics, 2015–2024. URL: <https://ctif.org/world-fire-statistics> (дата обращения: 10.03.2026).
3. Соколов С.В., Вагнер П. Оценка обстановки с пожарами в мире // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33. № 6. С. 67–94. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.67-84

4. Closing data gaps and paving the way for pan-European Fire Safety Efforts. Part I – overview of current practices for fire statistics / M. Manes [et al.] // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. № 4. P. 1925–1968. DOI: 10.1007/s10694-023-01415-6
5. Closing data gaps and paving the way for pan-European Fire Safety Efforts. Part II – terminology of fire statistical / M. Manes [et al.] // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. № 1. P. 1969–2000. DOI: 10.1007/s10694-023-01408-5
6. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г.: статистика пожаров и их последствий: информационно-аналитический сборник / А.А. Козлов [и др.]. Балашиха: ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с. EDN: PIKMXJ
7. О внесении изменений в Порядок учета пожаров и их последствий: приказ МЧС России от 8 окт.2018 г. № 431. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Брушлинский Н.Н., Клепко Е.А., Попков С.Ю. Анализ обстановки с пожарами в городах и сельской местности субъектов Российской Федерации // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2009. № 1. С. 92–99. EDN: NTYGFH
9. Пожары в городах и сельской местности России / Н.Н. Брушлинский [и др.] // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2008. № 2. С. 31–35. EDN: SKAVBT
10. Риски гибели и вреда здоровью городского и сельского населения России при пожарах (1996–2015 гг.) / В.И. Евдокимов В[и др.] // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2016. № 4. С. 5–20. DOI: 10.25016/2541-7487-2016-0-4-5-20 EDN: XGSKVB
11. Численность и миграция населения Российской Федерации в [2016–2023]: статистический бюллетень. М.: Росстат, 2017–2024. URL: <https://www.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 10.03.2026).
12. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году / МЧС России. М.: МЧС Медиа, 2025. 264 с.
13. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2012. 320 с. EDN: SUMOIH
14. Анализ производственного травматизма сотрудников Федеральной противопожарной службы МЧС России на вновь присоединенных территориях / А.А. Кондашов [и др.] // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2025. № 4. С. 32–42. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-4-32-42 EDN: PQLPPE

References

1. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti: Feder. zakon Ros. Federacii ot 22 iyulya 2008 g. № 123-FZ. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
2. World Fire Statistics. Center of Fire Statistics, 2015–2024. URL: <https://ctif.org/world-fire-statistics> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
3. Sokolov S.V., Vagner P. Ocenka obstanovki s pozharami v mire // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2024. T. 33. № 6. S. 67–94. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.67-84
4. Closing data gaps and paving the way for pan-European Fire Safety Efforts. Part I – overview of current practices for fire statistics / M. Manes [et al.] // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. № 4. P. 1925–1968. DOI: 10.1007/s10694-023-01415-6
5. Closing data gaps and paving the way for pan-European Fire Safety Efforts. Part II – terminology of fire statistical / M. Manes [et al.] // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. № 1. P. 1969–2000. DOI: 10.1007/s10694-023-01408-5
6. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2024 g.: statistika pozharov i ih posledstvij: informacionno-analiticheskij sbornik / A.A. Kozlov [i dr.]. Balashiha: VNIPO MCHS Rossii, 2025. 112 s. EDN: PIKMXJ

7. O vnesenii izmenenij v Poryadok ucheta pozharov i ih posledstvij: prikaz MCHS Rossii ot 8 okt.2018 g. № 431. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

8. Brushlinskij N.N., Klepko E.A., Popkov S.Yu. Analiz obstanovki s pozharemi v gorodah i sel'skoj mestnosti sub"ektov Rossijskoj Federacii // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2009. № 1. S. 92–99. EDN: NTYGFH

9. Pozhary v gorodah i sel'skoj mestnosti Rossii / N.N. Brushlinskij [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2008. № 2. S. 31–35. EDN: SKAVBT

10. Riski gibeli i vreda zdorov'yu gorodskogo i sel'skogo naseleniya Rossii pri pozharah (1996–2015 gg.) / V.I. Evdokimov V[i dr.] // Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah. 2016. № 4. S. 5–20. DOI: 10.25016/2541-7487-2016-0-4-5-20 EDN: XGSKVB

11. Chislennost' i migraciya naseleniya Rossijskoj Federacii v [2016–2023]: statisticheskij byulleten'. M.: Rosstat, 2017–2024. URL: <https://www.rosstat.gov.ru/> (data obrashcheniya: 10.03.2026).

12. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii zashchity naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tekhnogennogo haraktera v 2024 godu / MCHS Rossii. M.: MCHS Media, 2025. 264 s.

13. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. Analiz vremennyh ryadov i prognozirovanie: ucheb. posobie. M.: Finansy i statistika, 2012. 320 s. EDN: SUMOIH

14. Analiz proizvodstvennogo travmatizma sotrudnikov Federal'noj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii na vnov' prisoedinennyh territorijah / A.A. Kondashov [i dr.] // Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah. 2025. № 4. S. 32–42. DOI: 10.25016/2541-7487-2025-0-4-32-42 EDN: PQLPPE

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 27.03.2026; одобрена после рецензирования: 28.04.2026; принята к публикации: 29.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 27.03.2026; approved after review: 28.04.2026; accepted for publication: 29.04.2026

Информация об авторах:

Евдокимов Владимир Иванович, главный научный сотрудник ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России (194044, Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2), доктор медицинских наук профессор, e-mail: 9334616@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0771-2102>, SPIN-код: 1692-4593

Порошин Александр Алексеевич, главный научный сотрудник ВНИИПО МЧС России (143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), доктор технических наук, e-mail: vniipo_1_3@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9849-7024>, SPIN-код: 8429-8250

Сибирко Виталий Иванович, начальник сектора отдела пожарной статистики ВНИИПО МЧС России (143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), e-mail: otdel-16@vniipo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5319-6823>, SPIN-код: 4651-2338

Information about authors:

Evdokimov Vladimir I., principal research associate of ARCERM of EMERCOM of Russia (194044, Saint-Petersburg, Academica Lebedeva Str., 4/2), doctor of medical sciences, professor, e-mail: 9334616@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0771-2102>, SPIN: 1692-4593

Poroshin Aleksander A., principal research associate of the VNIIPO of EMERCOM of Russia (143903, Moscow region, Balashikha, md. VNIIPO, 12), doctor of technical sciences, e-mail: vniipo_1_3@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9849-7024>, SPIN 8429-8250

Sibirko Vitaly I., chief of sector of department of fire statistics of the VNIIPO of EMERCOM of Russia (143903, Moscow region, Balashikha, md. VNIIPO, 12), e-mail: otdel-16@vniipo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5319-6823>, SPIN: 4651-2338

Научная статья

УДК 620.193; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-13-19

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ КОРРОЗИИ
В ТРУБОПРОВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ КАК ФАКТОР
ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ**

✉ Хафизов Ильдар Фанилевич;

Султанов Рифкат Мухатъярович;

Бикмеев Вадим Ильфирович;

Бакиров Дамир Робертович.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

✉ ildar.hafizov@mail.ru

Аннотация. Надежность оборудования трубопроводного транспорта нефти определяет не только экономическую эффективность, но и уровень пожарной безопасности объектов инфраструктуры. Коррозионные разрушения, в особенности микробиологическая коррозия, являются одной из главных причин разгерметизации трубопроводов и запорной арматуры, что приводит к утечкам горючих жидкостей и газов, созданию взрывопожароопасных зон. В статье показано, что активность сульфатвосстанавливающих бактерий не только инициирует локальное разрушение металла, но и генерирует сероводород – токсичный и пожаровзрывоопасный газ, способный изменить категорию помещения по взрывопожарной опасности. На основе экспериментальных данных и регрессионного моделирования предложен подход к оценке эффективности ингибиторной защиты, позволяющий снизить скорость коррозии и, как следствие, вероятность возникновения пожара.

Ключевые слова: сульфатвосстанавливающие бактерии, биокоррозия, пожарная безопасность, разгерметизация трубопровода, сероводород, взрывопожароопасная зона, ингибиторы коррозии, риск возникновения пожара

Для цитирования: Моделирование процесса образования коррозии в трубопроводном транспорте как фактор повышения пожарной опасности / И.Ф. Хафизов [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 13–19. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-13-19

Scientific article

**MODELING OF CORROSION FORMATION IN PIPELINE TRANSPORT
AS A FACTOR OF INCREASED FIRE HAZARD**

✉ Hafizov Il'dar F.;

Sultanov Rifkat M.;

Bikmееv Vadim I.;

Bakirov Damir R.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

✉ ildar.hafizov@mail.ru

Abstract. The reliability of oil pipeline transport equipment determines not only economic efficiency but also the level of fire safety of infrastructure facilities. Corrosion damage, especially microbiologically influenced corrosion, is one of the main causes of pipeline and shut-off valve depressurization, leading to the leakage of flammable liquids and gases and the formation of explosive and fire-hazardous zones. The article demonstrates that the activity of sulfate-reducing bacteria not only initiates local metal destruction but also generates hydrogen sulfide – a toxic, flammable, and explosive gas capable of changing the fire and explosion hazard category of a facility.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Based on experimental data and regression modeling, an approach to evaluating the effectiveness of inhibitor protection is proposed, which reduces the corrosion rate and, consequently, the probability of fire occurrence.

Keywords: sulfate-reducing bacteria, biocorrosion, fire safety, pipeline depressurization, hydrogen sulfide, fire and explosion hazardous zone, corrosion inhibitors, fire risk

For citation: Modeling of corrosion formation in pipeline transport as a factor of increased fire hazard / I.F. Hafizov [et al.] // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 13–19. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-13-19

Введение

Разрушение оборудования от микробиологической коррозии (МБК) в системах трубопроводного транспорта нефти непосредственно связано с риском возникновения пожаров и взрывов. Сквозные коррозионные дефекты, образующиеся под действием сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ), приводят к утечкам углеводородных сред. Любая утечка нефти или нефтепродукта в присутствии источника зажигания создает условия для реализации пожароопасной ситуации [1].

Наряду с электрохимическими процессами, биокоррозия наносит значительный ущерб, являясь одной из основных причин аварийности трубопроводов [2]. Под биопленками на внутренних стенках развиваются язвенные очаги, снижающие прочность металла вплоть до разрыва. При этом два фактора усиливают пожарную опасность:

1. *Выброс горючей жидкости* под давлением с образованием факела или пролива.

2. *Выделение сероводорода* (продукта жизнедеятельности СВБ) – газа с широкими концентрационными пределами воспламенения (4,3–45,5 % об. в воздухе) и низкой температурой самовоспламенения (~260 °С).

По статистике на долю МБК приходится до 12,6 % всех повреждений [3], при этом именно питтинговая и щелевая коррозия наиболее опасны с точки зрения внезапных разрывов [4]. Технология поддержания пластового давления путем закачки пресной воды многократно ускоряет развитие СВБ, что одновременно повышает и коррозионную активность, и содержание сероводорода в попутном газе [5].

Материалы и методы

В ходе работы оценивалось биологическое загрязнение нефти и почвы СВБ.

Для этого были взяты пробы сернистой нефти с Ромашкинского и Игровского месторождений. Кроме того, отобраны образцы почвы в Курганской обл.: вблизи места прорыва нефтепровода и вдоль его трассы.

Микробиологию делали по стандартной методике, выдерживая пробы до 20 сут. [6]. Чтобы понять, как коррозия влияет на пожарную опасность, использовались два подхода:

1. Первый подход заключается в составлении регрессионного уравнения для прогнозирования скорости коррозии

2. Второй подход заключается в расчете пожарного риска по методике, взятой из Федерального закона Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ФЗ № 123-ФЗ) (для производственного объекта).

После 10 дней инкубации нефтяных проб был замечен небольшой темный осадок, среда стала мутной, на поверхности образовалась четкая пленка. Это указывает на присутствие серобактерий. Затем была сделана микроскопия методом «раздавленной капли» и замечены колонии тионовых бактерий [7].

Спустя 20 сут. выдержки в почвенных пробах в двух стартовых разведениях наблюдалось почернение осадка, обусловленное присутствием сульфида железа. Данный признак указывает на метаболическую активность сульфатредуцирующих микроорганизмов [8]. Количество живых клеток данных бактерий достигло 100 КОЕ/мл [9].

Результаты микробиологического анализа проб, отобранных на различных этапах нефте- и водоподготовки, свидетельствуют о повсеместном присутствии СВБ. Одним из очагов их распространения служат околоскважинные зоны. Например, на Ватьеганском и Южно-Ягунском промыслах фиксировались концентрации СВБ на уровне 10^5 – 10^6 клеток в мл [10].

При изучении микробного состава аллювиальных каолиновых глин, взятых на Просяновском месторождении (Россия), были выявлены несколько групп организмов: аэробы и факультативные анаэробы-гетеротрофы (представленные родами *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*), а также анаэробные формы – сульфатредукторы, бактерии, восстанавливающие железо, и клостридии. Их количественное распределение оказалось следующим: аэробные гетеротрофы – 10^6 клеток/г, анаэробные ферментативные бактерии и сульфатредукторы – по 10^5 клеток/г, железоредуцирующие микроорганизмы – 10^2 клеток/г [11].

Пласты, инфицированные СВБ, являются объектом систематического изучения в Башкортостане, начиная с 1970-х гг., где также разрабатываются методы их обработки бактерицидами [12]. На месторождениях (например, Арланском, Бураевском) установлена повсеместная высокая биозагрязненность: концентрация СВБ в воде, используемой для закачки, достигает $(2,5\text{--}6) \cdot 10^5$ клеток/см³. Как видно из табл. 1, наиболее высокий уровень концентрации СВБ наблюдается в нагнетательных скважинах, что является прямым следствием закачки в них сточных вод с установки подготовки нефти и комбината «Искож».

Таблица 1

Микробное загрязнение пластовых вод, извлекаемых вместе с углеводородами, а также жидкостей, нагнетаемых в пласт для поддержания давления

Объект	Арланская площадь	Николо-Березовская площадь	Саузбашевское месторождение
Добывающая скважина	10^1 – 10^2	10^2 – 10^3	10^1 – 10^3
Нефтеборный парк	10^2 – 10^3	10^3 – 10^4	10^1 – 10^3
Резервуары очистных сооружений	10^3 – 10^4	10^4 – 10^5	10^2 – 10^3
Нагнетательная скважина	10^5	10^4 – 10^7	10^4

В числе стратегий по преодолению указанной проблемы рассматриваются такие перспективные направления, как использование специализированных покрытий и применение ингибиторов различной природы (биологических и неорганических). На основании проведенного сравнительного анализа был сделан вывод о преимущественной целесообразности применения ингибиторной защиты [1].

В 2008 г. в ходе исследований, посвященных изучаемой проблематике, были получены значимые данные, расширяющие понимание вопроса. В рамках этих работ использовался метод сбора образцов и культивирования сульфатредуцирующих бактерий [6]. Все полученные сведения структурированы и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные, полученные в ходе оценки обсемененности микрофлорой типа сульфатредукторов на объектах нефтедобычи, курируемых нефтегазодобывающим управлением «Чекмагушнефть»

Месторождение	Точки отбора проб	Концентрация клеток, кл/мл
Манчаровское	КНС-1	10^2
	КНС-3	отсутствие роста
	БКНС-14	10^2
	КНС-17	10^1
	БКНС-23	отсутствие роста
Юсуповское	КНС-5	10^2
	КНС-6	10^2
	КНС-9	10^2
	КНС-10	10^1
	УПС «Красная звезда»	отсутствие роста
	Скв. 998	отсутствие роста
	Скв. 6381	10^1
Карача-Елгинское	Скв. 6016	10^1
	КНС-13	10^1
Менеузовского	КНС-13	10^1
	БКНС-20	10^2
	Скв. 15 дрт	отсутствие роста
Таймурзинское	БКНС-22	10^1
Чекмагушевское	БКНС-16	отсутствие роста
Чермасанское	УПС «Чермасан»	отсутствие роста
Щелкановское	КНС-13	10^1

Примечание: КНС – кустовая насосная станция; БКНС – блочная кустовая насосная станция; УПС – установка предварительного сброса воды.

Результаты

Анализ проб нефтепромысловых вод на содержание СВБ показал низкую степень бактериального загрязнения на месторождениях. Количество клеток СВБ не превышало 10^2 на миллилитр, что, вероятно, является следствием систематического применения бактерицидных реагентов.

Для оценки производительности ингибиторов был проведен регрессионный анализ, по итогам которого было выведено уравнение множественной регрессии:

$$Y = 44.6575 + 170.6036X_1 - 168.968X_2,$$

где: $Y - Z$, % (степень защиты); $X_1 - C_{\text{инг}}$, мг/л (концентрация); $X_2 - V_k$, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (скорость коррозии). Проведенное моделирование, основанное на официальной методике оценки пожарного риска, показало, что его уровень для рассматриваемого производственного объекта находится в пределах нормы. На рисунке наглядно представлено, что расчетная величина не превышает нормативного значения 10^{-6} .

Настоящая методика определяет процедуру оценки пожарных рисков на промышленных объектах. Основная идея заключается в сравнении расчетных значений с установленными нормами, которые прописаны в ФЗ № 123-ФЗ.

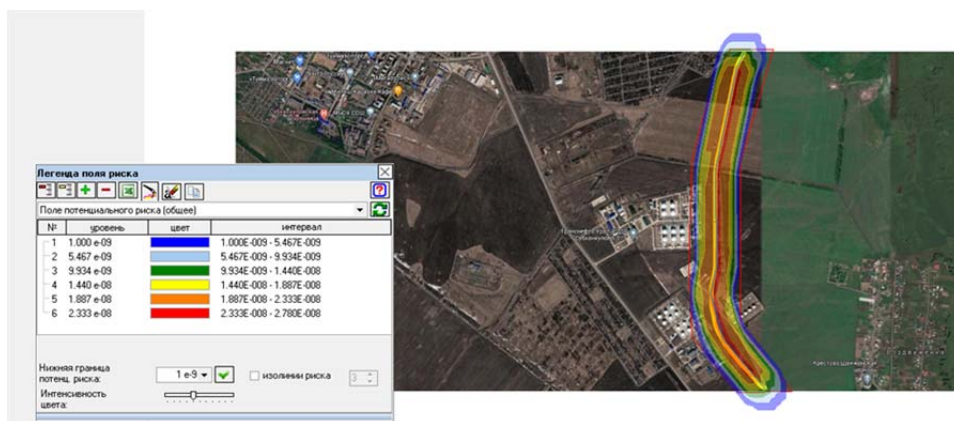


Рис. Расчет уровня риска

Заключение

Выполненные исследования доказывают прямую связь между микробиологической коррозией трубопроводов и показателями пожарной безопасности:

1. *Коррозия → разгерметизация → утечка горючей среды* – основной сценарий пожара на нефтеперекачивающих станциях и линейной части трубопроводов.

2. *Жизнедеятельность СВБ* приводит к образованию сероводорода, который:

– усиливает коррозионное растрескивание металла;

– делает среду более пожаровзрывоопасной (снижает нижний концентрационный предел воспламенения смеси).

3. Предложенная регрессионная модель позволяет подбирать режимы ингибирования, обеспечивающие скорость коррозии не выше $0,1\text{--}0,2 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$, что соответствует вероятности разгерметизации не более 10^{-6} в год на 1 км трубопровода.

4. Даже при нормативных значениях пожарного риска необходим постоянный мониторинг биоагрязнения, так как локальные очаги биокоррозии могут развиваться быстрее, чем система обнаружения утечек.

Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности:

– включить контроль СВБ в перечень обязательных параметров при оценке пожарного риска трубопроводов;

– при концентрации сероводорода в газовой фазе $> 0,5 \text{ \% об.}$ пересматривать категорию взрывопожароопасности участка;

– использовать комбинированную защиту: ингибиторы коррозии + бактерициды + дистанционный контроль толщины стенки.

Только системный подход, объединяющий противокоррозионную защиту и управление пожарными рисками, позволит снизить аварийность и обеспечить устойчивую работу трубопроводного транспорта.

Список источников

1. Биокоррозия объектов промышленных предприятий и методы защиты от нее / Ю.В. Нанзатоол [и др.] // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2015. № 4 (12). С. 79–87.

2. Шаханова С.С., Аманжолов Ж.К. Анализ причин наружной коррозии нефтепроводов // Труды университета. 2015. № 2 (59). С. 152–154.

3. The Effect of Microstructure on Microbiologically Influenced Corrosion / D. Walsh [et al.] // JOM. 1993. Vol. 45. P. 22–30. DOI: 10.1007/BF03222429

4. Подавалов Ю.А. Экология нефтегазового производства. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 416 с.

5. Booth G.H., Tiller A.K. Cathodic characteristics of mild steel in suspension of sulphate-reducing bacteria // *Corr. Sci.* 1968. Vol. 8. № 8. P. 583–600.
6. Jacq V.A., Roger P.A. Evaluation des risques de sulfato-reduction en riziere au mouen d'un critere microbiologique mesurable in situ // *Cah. Os-TROM., Ser. Biol.* 1978. Vol. 8. № 2. P. 137–142.
7. Гинзбург К.Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 118 с.
8. Booth G.H., Cooper A.W., Tiller A.K. Criteria of soil aggressiveness towards buried metals // *Br. Corros. J.* 1968. Vol. 2. P. 104–118.
9. Connel W.E., Patrick W.H. Jr. Sulfate reduction in soil: effects of redox potential and pH // *Science*. 1968. Vol. 159. № 3810. P. 86–89.
10. Герасименко А.А. О проблемах защиты конструкций от микробиологической коррозии и методах определения стойкости металлов и покрытий к биоповреждениям // *Защита металлов*. 1979. Т. 15. № 4. С. 426–431.
11. Исследование структуры сульфидных пленок, образующихся в процессе коррозии стали в сероводородной минерализованной водной среде / М.Д. Гетманский [и др.] // *Коррозия и защита*. 1982. № 1. С. 5–8.
12. Новоселова Е. А., Ивахнюк С. Г. Выбор коррозионностойких сталей и сплавов на основе железа для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных коррозией нефтепроводов // *Техносферная безопасность*. 2021. № 2. С. 11–20.

References

1. Biokorroziya ob"ektov promyshlennyh predpriyatij i metody zashchity ot nee / Yu.V. Nanzatool [i dr.] // *Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2015. № 4 (12). S. 79–87.
2. Shahanova S.S., Amanzholov Zh.K. Analiz prichin naruzhnoj korrozii nefteprovodov // *Trudy universiteta*. 2015. № 2 (59). S. 152–154.
3. The Effect of Microstructure on Microbiologically Influtoenced Corrosion / D. Walsh [et al.] // *JOM*. 1993. Vol. 45. P. 22–30. DOI: 10.1007/BF03222429
4. Podavalov Yu.A. *Ekologiya neftegazovogo proizvodstva*. M.: Infra-Inzheneriya, 2010. 416 s.
5. Booth G.H., Tiller A.K. Cathodic characteristics of mild steel in suspension of sulphate-reducing bacteria // *Corr. Sci.* 1968. Vol. 8. № 8. P. 583–600.
6. Jacq V.A., Roger P.A. Evaluation des risques de sulfato-reduction en riziere au mouen d'un critere microbiologique mesurable in situ // *Cah. Os-TROM., Ser. Biol.* 1978. Vol. 8. № 2. P. 137–142.
7. Ginzburg K.E. Fosfor osnovnyh tipov pochv SSSR. M.: Nauka, 1981. 118 s.
8. Booth G.H., Cooper A.W., Tiller A.K. Criteria of soil aggressiveness towards buried metals // *Br. Corros. J.* 1968. Vol. 2. P. 104–118.
9. Connel W.E., Patrick W.H. Jr. Sulfate reduction in soil: effects of redox potential and pH // *Science*. 1968. Vol. 159. № 3810. P. 86–89.
10. Gerasimenko A.A. O problemah zashchity konstrukcij ot mikrobiologicheskoy korrozii i metodah opredeleniya stojkosti metallov i pokrytij k biopovrezhdeniyam // *Zashchita metallov*. 1979. Т. 15. № 4. S. 426–431.
11. Issledovanie struktury sul'fidnyh plenok, obrazuyushchihsya v processe korrozii stali v serovodorodnoj mineralizovannoj vodnoj srede / M.D. Getmanskij [i dr.] // *Korroziya i zashchita*. 1982. № 1. S. 5–8.
12. Новоселова Е. А., Ивахнюк С. Г. Выбор коррозионностойких сталей и сплавов на основе железа для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных коррозией нефтепроводов // *Техносферная безопасность*. 2021. № 2. С. 11–20.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 04.05.2026; одобрена после рецензирования: 04.06.2026;
принята к публикации: 06.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 04.05.2026; approved after review: 04.06.2026;
accepted for publication: 06.06.2026

Информация об авторах:

Хафизов Ильдар Фанилевич, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), доктор технических наук, профессор, e-mail: ildar.hafizov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6316-9725>

Султанов Рифкат Мухатьярович, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), доктор химических наук, e-mail: sultanov55@mail.ru

Бикмеев Вадим Ильфирович, аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), e-mail: vadudusbikmееv@gmail.com

Бакиров Дамир Робертович, аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru

Information about authors:

Khafizov Il'dar F., professor of the department of fire and industrial safety of the Ufa State Petroleum Technological University (450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1), doctor of technical sciences, professor, e-mail: ildar.hafizov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6316-9725>

Sultanov Rifkat M., professor of the department of fire and industrial safety of the Ufa State Petroleum Technological University (450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1), doctor of chemical sciences, e-mail: sultanov55@mail.ru

Bikmееv Vadim I., postgraduate student of the Ufa State Petroleum Technological University (450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1), e-mail: vadudusbikmееv@gmail.com

Bakirov Damir R., postgraduate student of the Ufa State Petroleum Technological University (450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1), e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru

Научная статья

УДК 629.463.32, 614.841; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЭСКАЛАЦИИ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Самигуллин Гафур Халафович;

✉Трегуб Нина Александровна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉nn.tgb@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта при перевозке легковоспламеняющихся жидкостей. Показано, что разгерметизация цистерны с бензином АИ-95 в условиях скопления подвижного состава на маневровых путях может инициировать цепную реакцию возгораний соседних объектов. Построена марковская цепь развития аварийной ситуации, включающая девять состояний системы – от штатного режима до катастрофических последствий. Получены аналитические выражения и численные оценки вероятностей состояний. Установлено, что при заданных интенсивностях переходов вероятность реализации сценария с каскадным пожаром к моменту времени 50 мин. составляет 97,75 %. Результаты исследования могут быть использованы для обоснования организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба и повышению уровня пожарной безопасности на железнодорожных объектах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортировка опасных грузов, пожар, взрыв, каскадный процесс

Для цитирования: Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах железнодорожного транспорта // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 20–30. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

Scientific article

**ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF FIRE ESCALATION
AT RAILWAY TRANSPORT FACILITIES**

Samigullin Gafur H.;

✉Tregub Nina A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉nn.tgb@mail.ru

Abstract. The problem of cascading fire and explosion hazards at rail infrastructure facilities transporting flammable liquids is considered. It is shown that depressurization of a tank car carrying AI-95 gasoline in conditions of rolling stock accumulation on shunting tracks can initiate a chain reaction of fires in adjacent objects. A Markov chain of emergency development is constructed, including nine system states – from normal operation to catastrophic consequences. Analytical expressions and numerical estimates of the state probabilities are obtained. It is established that, for given transition rates, the probability of a cascading fire scenario occurring by 50 min. is 97,75 %. The results of the study can be used to justify organizational and technical measures to minimize damage and improve fire safety at railway facilities.

Keywords: railway transport, transportation of dangerous goods, fire, explosion, cascade process

For citation: Samigullin G.H., Tregub N.A. Assessment of the probability of fire escalation at railway transport facilities // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 20–30. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-20-30

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Введение

Транспортировка опасных грузов железнодорожным транспортом сопряжена с повышенным риском возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций, способных перерасти в каскадные события с катастрофическими последствиями. Ежедневный объем транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и сжиженных углеводородных газов исчисляется тысячами тонн, что объективно повышает вероятность аварийных ситуаций.

Специфика железнодорожной инфраструктуры характеризуется следующими факторами пожарной опасности:

- наличием большого количества единиц подвижного состава с различными горючими материалами;
- параллельным расположением сформированных железнодорожных составов на путях;
- узкими разрывами между составами, способствующими быстрому распространению огня;
- затруднённым подъездом пожарных автомобилей и прокладкой рукавных линий;
- недостаточной мощностью и слабой развитостью сети противопожарного водоснабжения.

Анализ существующих подходов к моделированию каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций показывает широкое применение марковских цепей.

Таранцев А.А. с соавторами успешно применили марковские модели для описания каскадного развития пожаров на автостоянках [1], подземных автостоянках [2] и морских нефтяных терминалах [3], получив аналитические выражения для конечных вероятностей состояний и отработав сценарии тушения и восстановления.

Исследованы пожароопасные ситуации на паромках и плавучих автостоянках [4], судах [5], а также смежные задачи надежности для железнодорожных вагонов [6], путей [7], цистерн [8] и сетей связи железнодорожного транспорта [9]. Однако данные работы либо не рассматривают каскадную эскалацию, либо направлены на оценку технического состояния, а не пожарной безопасности.

Прус М.Ю. исследовал стохастическое моделирование каскадных сценариев чрезвычайных ситуаций [10], а Н.Г. Топольский с соавторами разработали машинообучаемую модель для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития [11]. Моторыгин Ю.Д. с соавторами [12] применили метод цепей Маркова для моделирования чрезвычайных ситуаций на объектах производства и хранения сжиженного природного газа. С использованием MATLAB и Simulink получены зависимости вероятностей состояний от времени. Анализ вероятностей позволяет определить критические моменты для оперативного вмешательства и предотвращения развития аварийной ситуации. Вопросы поддержания готовности систем защиты рассмотрены Л.Т. Танклевским [13, 14], а систематизация типов марковских моделей приведена в обзоре [15].

Несмотря на наличие перечисленных исследований, в доступной научной литературе отсутствуют работы, посвященные применению марковских цепей с непрерывным временем для моделирования каскадного развития пожаровзрывоопасных ситуаций на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта при перевозке опасных грузов. Существующие модели либо ориентированы на автомобильный транспорт и стационарные объекты хранения, либо решают смежные задачи (поддержание готовности технических систем, прогнозирование ранга пожара, динамика подвижного состава), но не оценивают вероятность эскалации пожара между цистернами на маневровых и перегрузочных путях с учетом теплового воздействия, физических процессов распространения огня и каскадного вовлечения соседних объектов.

Особую опасность представляет каскадный характер развития пожаровзрывоопасных ситуаций. Разгерметизация одной цистерны с бензином АИ-95 может инициировать:

- образование пролива ЛВЖ и пожара пролива;
- тепловой пробой соседних цистерн;
- взрыв паровоздушной смеси с образованием огненного шара;
- эскалацию пожара на объекты инфраструктуры.

Таким образом, моделирование вероятности эскалации пожара на объектах железнодорожного транспорта представляется научно и практически значимой задачей.

Цель работы – разработка марковской модели каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации при разгерметизации цистерны с ЛВЖ и получение количественных оценок вероятности эскалации пожара.

Методы исследования

Рассматривается сценарий каскадной аварии (рис. 1), ранее опубликованный в работе [16]. Процесс начинается с разгерметизации сливного устройства цистерны № 4 с бензином на путях железнодорожной станции, сопровождающейся истечением и возгоранием жидкости. Развитие процесса моделируется через тепловое воздействие на соседнюю цистерну № 5, приводящее к ее разрушению, мгновенному переходу нефтепродукта в парокапельную фазу и формированию огненного шара [16].

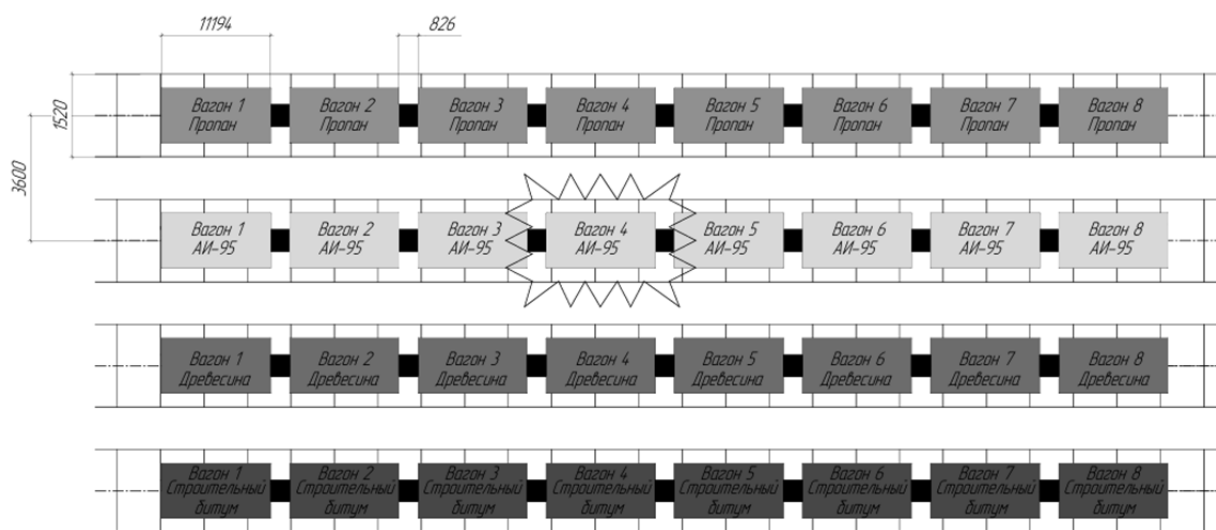


Рис. 1. Схема размещения опасных грузов на перегрузочном участке [15]

Моделирование процесса эскалации пожара целесообразно проводить с использованием математической теории марковских цепей [17, 18]. Ситуация на участке маневровых путей может быть описана множеством состояний $\{S\}$, например, $S_1 \div S_9$ (табл. 1), граф переходов для которых приведен на рис. 2 (табл. 2).

Таблица 1

Состояния системы при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

S_i	Состояние
S_1	Цистерна работает в штатном режиме
S_2	Разгерметизация 1-ой цистерны с ЛВЖ
S_3	Пожар пролива
S_4	Паровое облако
S_5	Огненный шар
S_6	Взрыв паровоздушной смеси
S_7	Тепловое воздействие
S_8	Разгерметизация 2-й цистерны
S_9	Каскадный пожар

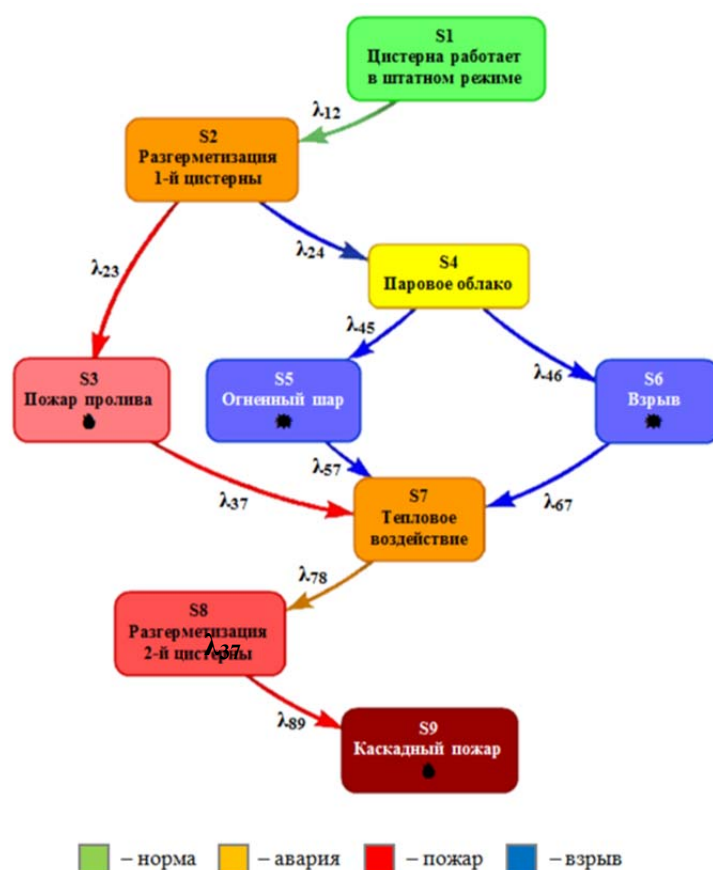


Рис. 2. Граф переходов между состояниями

Таблица 2

Переходы между состояниями (с описанием и вероятностями)

Переход	Вероятность	Описание
$S_1 \rightarrow S_2$	P_{12}	Вероятность аварии (сход с рельсов, повреждение и т.п.)
$S_2 \rightarrow S_3$	P_{23}	Пролив $\rightarrow$ возгорание над лужей (зависит от источника зажигания)
$S_2 \rightarrow S_4$	P_{24}	Пролив $\rightarrow$ интенсивное испарение $\rightarrow$ паровое облако
$S_4 \rightarrow S_5$	P_{45}	Мгновенное воспламенение $\rightarrow$ огненный шар
$S_4 \rightarrow S_6$	P_{46}	Задержанное воспламенение в частично замкнутом пространстве
$S_3 \rightarrow S_7$	≈ 1	Пожар пролива почти всегда даёт $q > q_{кр}$ на близких расстояниях
$S_5 \rightarrow S_7$	≈ 1	Огненный шар создает высокий тепловой поток
$S_6 \rightarrow S_7$	P_{67}	Вызывает тепловую нагрузку и разрушения, но не всегда направляет энергию на соседние цистерны
$S_7 \rightarrow S_8$	P_{78}	Вероятность разрушения соседней цистерны (зависит от q , времени, расстояния)
$S_8 \rightarrow S_9$	≈ 1	Новая утечка почти неизбежно приводит к новому очагу

Задача определения вероятностей $\{P^k\}$ состояний системы после завершения каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации сводится к следующему. По данным о количественных значениях интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ и начальных вероятностей $\{P^0\}$ состояний (как правило, $P_1^0 = 1$, $P_2^0 = \dots = P_9^0 = 0$) требуется найти конечные вероятности $\{P^k\}$, прежде всего P_9 , характеризующую вероятность реализации каскадного сценария развития пожара.

Решение данной задачи осуществляется методом А.Н. Колмогорова для марковских процессов с непрерывным временем [19]. Динамика вероятностей состояний описывается системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, где интенсивности переходов $\{\lambda_{ji}\}$ определяют скорость перехода системы из одного состояния в другое. Численные величины $\{\lambda_{ij}\}$ могут быть определены статистически на основе анализа ретроспективных данных о пожарах и авариях на железнодорожном транспорте или экспертными методами с привлечением специалистов в области пожарной безопасности.

Составляется матрица переходов P , которая применительно к графу на рис. 2 приведена в табл. 3. Особенность матрицы P заключается в том, что сумма вероятностей в каждой строке равна единице ($\sum_j P_{ij}=1$), что отражает полноту группы событий при переходе системы из i -го состояния во все возможные последующие состояния.

Таблица 3

Матрица вероятностей переходов P применительно к графу на рис. 2

{S}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$1-P_{12}$	P_{12}	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$1-P_{23}-P_{24}$	P_{23}	P_{24}	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	$1-P_{45}-P_{46}$	P_{45}	P_{46}	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	$1-P_{67}$	P_{67}	0	0
7	0	0	0	0	0	0	$1-P_{78}$	P_{78}	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Для процесса с непрерывным временем представляются как интенсивности переходов $\{\lambda_{ij}\}$. Динамика вероятностей описывается системой уравнений Колмогорова [19, 20].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - \lambda_{37}P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - (\lambda_{45} + \lambda_{46})P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4 - \lambda_{57}P_5, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{46}P_4 - \lambda_{67}P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_{37}P_3 + \lambda_{57}P_5 + \lambda_{67}P_6 - \lambda_{78}P_7, \\ \frac{dP_8}{dt} = \lambda_{78}P_7 - \lambda_{89}P_8, \\ \frac{dP_9}{dt} = \lambda_{89}P_8. \end{array} \right.$$

Интенсивности переходов $\{\lambda_{ij}\}$ представлены в (табл. 4).

Таблица 4

Интенсивности переходов λ_{ij}

$\lambda_{ij}, \text{мин}^{-1}$	Значение	Описание перехода
λ_{12}	0,1	возникновение аварии (разгерметизация)
λ_{23}	0,3	возгорание пролива ЛВЖ
λ_{24}	0,7	образование парового облака
λ_{37}	1,0	тепловое воздействие от пожара пролива
λ_{45}	0,4	мгновенное воспламенение → огненный шар
λ_{46}	0,6	задержанное воспламенение → взрыв
λ_{57}	1,0	тепловое воздействие огненного шара
λ_{67}	0,8	тепловое воздействие взрыва
λ_{78}	0,2	разрушение соседней цистерны
λ_{89}	0,5	каскадный пожар (эскалация)

Результаты исследования и их обсуждение

Численное решение системы уравнений выполнено методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования $\Delta t = 0,01$ мин на интервале $[0; 50]$ мин. Начальные условия: $P_1^0 = 1, P_{2-9}^0 = 0$.

На рис. 3 представлена динамика вероятностей всех состояний системы $P_i(t)$ в процессе развития аварийной ситуации.

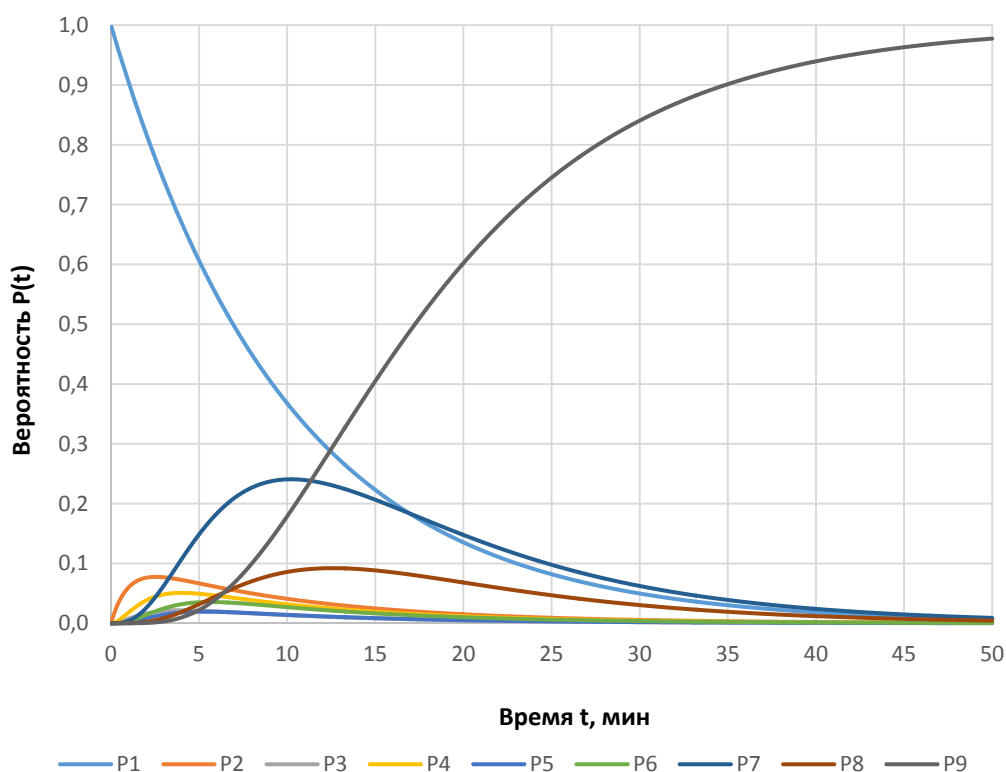


Рис. 3. Динамика вероятностей состояний $P_i(t)$ при каскадном развитии пожаровзрывоопасной ситуации

Вероятность штатного режима функционирования системы P_1 демонстрирует экспоненциальный характер убывания от начального значения, равного единице, до практически нуля к моменту времени $t = 50$ мин.

Вероятности промежуточных состояний $P_2 \div P_8$ характеризуются немонотонным изменением во времени с четко выраженными максимумами в интервале $t = 5 \dots 15$ мин, что соответствует фазе наиболее интенсивного развития аварийной ситуации. При этом максимальные значения вероятностей данных состояний не превышают 0,20–0,25, что свидетельствует о быстром переходе системы через промежуточные стадии.

Анализ зависимости вероятности реализации каскадного сценария пожара $P_9(t)$ на рис. 3 показывает, что кривая имеет характерную S-образную форму, которую можно разделить на три различных участка.

На начальном участке ($t = 0 \dots 5$ мин) вероятность P_9 практически равна нулю, что объясняется нахождением системы в начальных состояниях аварийной ситуации ($S_1 \div S_3$), когда происходит только разгерметизация цистерны и возгорание пролива без распространения пожара на соседние объекты.

На участке интенсивного развития ($t = 5 \dots 30$ мин) наблюдается быстрый рост вероятности каскадного пожара. Максимальная скорость роста достигается в точке перегиба кривой, расположенной в интервале $t \approx 15 \dots 20$ мин. Данный участок соответствует активной фазе эскалации, когда тепловое воздействие от пожара пролива и огненного шара приводит к разрушению оболочек соседних цистерн и вовлечению их в процесс горения.

На участке насыщения ($t > 30$ мин) кривая выходит на значение $P_9^k \approx 0,9795$, что соответствует установившемуся режиму процесса. Практически горизонтальный характер кривой на данном участке свидетельствует о завершении каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации и переходе системы в одно из поглощающих состояний.

Результаты численного расчета динамики вероятностей состояний системы представлены в табл. 5.

Таблица 5

Динамика вероятностей состояний системы

Время, мин	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	$\sum P_i$
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1,00	0,9048	0,0599	0,0076	0,0178	0,0022	0,0034	0,0041	0,0002	0,0000	1
5,00	0,6065	0,1213	0,0364	0,0728	0,00182	0,0455	0,0455	0,0318	0,0220	1
10,00	0,3679	0,1472	0,0589	0,0883	0,0353	0,0707	0,0883	0,0883	0,0551	1
25,00	0,0821	0,0657	0,0394	0,0394	0,0236	0,0354	0,1578	0,2368	0,3200	1
50,00	0,0067	0,0134	0,0101	0,0134	0,0101	0,0134	0,0808	0,1347	0,9775	1

Полученное значение конечной вероятности $P_9^k = 0,9775$ (97,75 %) свидетельствует о чрезвычайно высоком риске реализации каскадного сценария развития пожара при заданных интенсивностях переходов. Это означает, что при разгерметизации цистерны с бензином АИ-95 в условиях плотной расстановки подвижного состава на маневровых путях практически неизбежно распространение пожара на соседние цистерны с образованием огненного шара и эскалацией пожаровзрывоопасной ситуации.

Заключение

Учитывая пожаровзрывоопасность цистерн с нефтепродуктами и специфические условия их размещения на маневровых путях, обоснована актуальность исследования процесса каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Показана возможность описания процесса эскалации пожара с использованием цепи Маркова с непрерывным временем и метода А.Н. Колмогорова. Получены взаимосогласующиеся аналитические и численные результаты, подтверждающие корректность модели. Установлено, что при заданных интенсивностях переходов вероятность реализации сценария с каскадным пожаром составляет $P_9^k = 0,9775$ (97,75 %), что указывает на критически высокий риск распространения аварии на соседние цистерны.

Полученные результаты могут послужить основой для совершенствования методической базы в области снижения пожарной опасности при перевозках опасных грузов, а также разработки организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба при угрозе каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на объектах железнодорожного транспорта.

Предложенный методический подход рекомендуется к применению для:

- количественной оценки пожарной опасности конкретных участков железнодорожной инфраструктуры;
- оптимизации схем размещения подвижного состава и систем противопожарной защиты;
- обоснования требований к нормативным документам в области безопасной транспортировки опасных грузов.

Список источников

1. Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А. Марковская модель каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 4. С. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25
2. О моделировании каскадного развития чрезвычайных ситуаций при пожарах на подземных автостоянках / А.А. Таранцев [и др.] // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140
3. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании экологической и пожарной безопасности морских нефтяных терминалов цепями Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3. С. 339–346. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.059
4. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромках и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1. С. 270–275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032
5. О моделировании пожароопасной ситуации на судне с использованием цепей Маркова / А.А. Таранцев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 1. С. 320–326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033
6. Data-Driven Railway Vehicle Parameter Tuning using Markov-Chain Monte Carlo Bayesian updating / C. Hoelzl [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2024. № 2647. P. 182024. DOI: 10.1088/1742-6596/2647/18/182024
7. Yan T.-H., De Almeida Costa M., Corman F. Developing and Extending Status Prediction Models for Railway Tracks Based on On-Board Monitoring Data // Transportation Research Record. 2023. № 2677 (6). P. 708–719. DOI: 10.1177/03611981221150245
8. Forecasting the state of technogenic emergency situation on the railway transport using data mining technologies / T. Savchuk [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2014. № 90 (1). P. 50–53. DOI: 10.12915/pe.2014.01.12

9. Канаев А.К., Алексеев А.И. Имитационная модель полумарковского типа для исследования надежности устройств TSN при работе в сетях связи железнодорожного транспорта // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 43–52. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52 EDN:CFAOSQ
10. Прус М.Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 170–195. DOI: 10.25257/TTS.2022.5.95.170-195
11. Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития / Н.Г. Топольский [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51. DOI: 10.22227/0869 7493.2021.30.06.39-51
12. Самигуллин Г.Х., Евлоев З.Б. Чрезвычайные ситуации на объектах производства и хранения сжиженного природного газа // Безопасность жизнедеятельности. 2026. № 2. С. 48–51.
13. Танклевский Л.Т., Зыбина О.А., Таранцев А.А. Применение марковских цепей к задачам поддержания готовности организационных и технических систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2 (62). С. 26–34. EDN: NUZAGG
14. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А. Метод управления поддержанием готовности средств противопожарной защиты с использованием Марковских цепей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 4. С. 60–69.
15. Review of Probabilistic Modeling of Pavement Performance Using Markov Chains / M.S. Yamany [et al.] // Preprints. 2024. DOI: 10.20944/preprints202407.1863.v1
16. Самигуллин Г.Х., Трегуб Н.А., Ивахнюк Г.К. Оценка вероятности эскалации пожара на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98
17. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
18. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. СПб.: Стратегия будущего, 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book_011222 EDN: CCRIRT
19. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.
20. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 230 с. EDN: IMLKWS

References

1. Tarancev A.A., Kozhevnikov D.F., Potashev D.A. Markovskaya model' kaskadnogo razvitiya pozharovzryvoopasnoj situacii na avtostoyanke // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2023. № 4. S. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130H-2023-4-16-25
2. O modelirovanii kaskadnogo razvitiya chrezvychajnyh situacij pri pozharah na podzemnyh avtostoyankah / A.A. Tarancev [i dr.] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3 (67). S. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140
3. Tarancev A.A., Marinov M.L., Konovalov I.N. O modelirovaniya ekologicheskoy i pozharnoj bezopasnosti morskikh neftnykh terminalov cepyami Markova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 3. S. 339–346. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.059
4. Tarancev A.A., Marinov M.L., Konovalov I.N. O sposobe modelirovaniya pozharovzryvoopasnykh situacij na paromah i plavuchih avtostoyankah s ispol'zovaniem cepej Markova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. № 1. S. 270–275. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.032
5. O modelirovaniya pozharoопасnoj situacii na sudne s ispol'zovaniem cepej Markova / A.A. Tarancev [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2026. № 1. S. 320–326. DOI: 10.37220/MIT.2026.71.1.033

6. Data-Driven Railway Vehicle Parameter Tuning using Markov-Chain Monte Carlo Bayesian updating / C. Hoelzl [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. № 2647. P. 182024. DOI: 10.1088/1742-6596/2647/18/182024
7. Yan T.-H., De Almeida Costa M., Corman F. Developing and Extending Status Prediction Models for Railway Tracks Based on On-Board Monitoring Data // *Transportation Research Record*. 2023. № 2677 (6). P. 708–719. DOI: 10.1177/03611981221150245
8. Forecasting the state of technogenic emergency situation on the railway transport using data mining technologies / T. Savchuk [et al.] // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. № 90 (1). P. 50–53. DOI: 10.12915/pe.2014.01.12
9. Kanaev A.K., Alekseev A.I. Imitacionnaya model' polumarkovskogo tipa dlya issledovaniya nadezhnosti ustroystv TSN pri rabote v setyah svyazi zheleznodorozhnogo transporta // *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi*. 2025. T. 11. № 6. S. 43–52. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52 EDN:CFAOSQ
10. Prus M.Yu. Stokhasticheskoe modelirovanie kaskadnykh scenariy vozniknoveniya i razvitiya chrezvychajnykh situacij // *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2022. № 1 (95). S. 170–195. DOI: 10.25257/TTS.2022.5.95.170-195
11. Primenenie mashinoobuchaemykh cepej Markova dlya opredeleniya ranga pozhara i prognozirovaniya faz ego razvitiya / N.G. Topol'skij [i dr.] // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2021. T. 30. № 6. S. 39–51. DOI: 10.22227/0869 7493.2021.30.06.39-51
12. Samigullin G.H., Evloev Z.B. Chrezvychajnye situacii na ob"ektah proizvodstva i hraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2026. № 2. S. 48–51.
13. Tanklevskij L.T., Zybina O.A., Tarancev A.A. Primenenie markovskikh cepej k zadacham podderzhaniya gotovnosti organizacionnykh i tekhnicheskikh sistem // *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. 2023. T. 12. № 2 (62). S. 26–34. EDN: NUZAGG
14. Tanklevskij L.T., Tarancev A.A., Babikov I.A. Metod upravleniya podderzhaniem gotovnosti sredstv protivopozharnoj zashchity s ispol'zovaniem Markovskikh cepej // *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii»*. 2022. № 4. S. 60–69.
15. Review of Probabilistic Modeling of Pavement Performance Using Markov Chains / M.S. Yamany [et al.] // *Preprints*. 2024. DOI: 10.20944/preprints202407.1863.v1
16. Samigullin G.H., Tregub N.A., Ivahnyuk G.K. Ocenka veroyatnosti eskalacii pozhara na ob"ektah infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2025. № 3 (75). S. 87–98. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-87-98
17. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972. 552 s.
18. Butyrskij E.Yu., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov. SPb.: Strategiya budushchego, 2022. 733 s. DOI: 10.37468/book_011222 EDN: CCRIRT
19. Kolmogorov A.N. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. M.: Nauka, 1986. 534 s.
20. Matveev A.V. Metody modelirovaniya i prognozirovaniya. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 230 s. EDN: IMLKWS

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.04.2026; одобрена после рецензирования: 25.05.2026;
принята к публикации: 26.05.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.04.2026; approved after review: 25.05.2026;
accepted for publication: 26.05.2026

Информация об авторах:

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>

Трегуб Нина Александровна, аспирант Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: nn.tgb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4630-5861>

Information about authors:

Samigullin Gafur H., professor of the department of physical and chemical foundations of combustion and extinguishing processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>

Tregub Nina A., postgraduate student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: nn.tgb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4630-5861>

Научная статья

УДК 614.84:621.316.1; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ПЕРЕГРУЗКИ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Полунин Георгий Александрович;

✉ **Таваров Саиджон Ширалиевич.**

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия

✉ **tabarovsaid@mail.ru**

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния изменения режима работы бытовых электроприемников на состояние изоляции электропроводки, нарушение которой может приводить к возникновению пожароопасной ситуации. С применением имитационного моделирования в среде Matlab на основе уравнений теплового баланса построены модели тепловых процессов в проводнике. Полученная модель позволяет исследовать распределение температур внутри и на поверхности изолированного проводника. На основе результатов моделирования показано изменение тепловых характеристик при варьировании электрической нагрузки бытовых однофазных потребителей в условиях несимметрии. Получена зависимость времени достижения установившегося теплового режима от кратности выделяемого на поверхности проводника количества тепла и тока. Установлено, что при длительности протекания тока, превышающего допустимые значения (от 20 сек. и более), возникает риск термической деструкции изоляции, что создает условия для возникновения короткого замыкания и последующего пожара.

Ключевые слова: коммунально-бытовые электроприемники, тепловые процессы, пожарная безопасность, городские электрические сети, имитационное моделирование

Для цитирования: Полунин Г.А., Таваров С.Ш. Моделирование тепловых процессов при аварийных режимах перегрузки в городских распределительных сетях // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 31–39. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

Scientific article

MODELING OF THERMAL PROCESSES DURING EMERGENCY OVERLOAD CONDITIONS IN URBAN DISTRIBUTION NETWORKS

Polunin Georgy A.;

✉ **Tavarov Saidjon Sh.**

South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

✉ **tabarovsaid@mail.ru**

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of changes in the operating mode of household electrical appliances on the state of wiring insulation, the damage of which can lead to fire hazards. Using simulation modeling in the Matlab environment based on heat balance equations, models of thermal processes in a conductor were developed. The resulting model allows for the investigation of temperature distribution both inside and on the surface of an insulated conductor. Based on the simulation results, changes in thermal characteristics are shown when varying the electrical load of household single-phase consumers under unbalanced conditions. The dependence of the time to reach a steady-state thermal regime on the ratio of heat dissipation on the conductor surface and the current ratio was obtained.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

It was established that when the duration of the current flow exceeds permissible values (20 seconds or more), there is a risk of thermal degradation of the insulation, which creates conditions for a short circuit and a subsequent fire.

Keywords: household electrical appliances, thermal processes, fire safety, urban electrical networks, simulation modeling

For citation: Polunin G.A., Tavarov S.Sh. Modeling of thermal processes during emergency overload conditions in urban distribution networks // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 31–39. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

Введение

Коммунально-бытовые сети характеризуются разнообразной нагрузкой, включающей осветительные установки, бытовые приборы и климатическое оборудование. Преобладание однофазных приемников приводит к несимметричной нагрузке отдельных фаз, что необходимо учитывать при проведении пожарно-технической экспертизы. Важной особенностью экспертизы является применение расчетных методов для установления очага пожара и выявления причинно-следственных связей. В частности, зависимость выделения количества тепла от времени достижения критических температур изоляции позволяет обосновать электротехническую причину пожара.

Коммунально-бытовые сети имеют особенное распределение электроэнергии до потребителей. От ячейки подстанции по линии электропередачи напряжением 10 кВ подводится питание до потребительской трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ. Далее с потребительской трансформаторной подстанции по кабельной линии (трёхфазной четырёхжильной) подводится питание до вводно распределительного устройства.

После этого равномерно (симметрично) по фазам распределяется нагрузка в зависимости от обеспеченности дополнительными источниками потребителей (газоснабжения, теплогорячего водоснабжения) согласно [1]. Таким образом задаётся проектная удельная электрическая нагрузка на одного потребителя, исходя из которой при проектировании распределяются нагрузки по фазам. При этом несимметрия в сети не должна превышать установленные нормы [2, 3] на 2 % и 4 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования влияния режима работы бытовых электроприемников была построена трехфазная модель распределительной сети напряжением 380 В (рис. 1). Эта модель была построена в среде Matlab для исследования влияния режима работы бытовых электроприемников на состояние изоляции электропроводки в коммунально-бытовых сетях. Модель включает источник питания, трансформатор, измеритель параметров, блок тепловых процессов, бытовую электрическую нагрузку и осциллограф.

Моделирование тепловой энергии на поверхности проводника реализовано в среде Matlab в виде блока тепловых процессов (рис. 2). Этот блок основан на уравнениях теплового баланса и позволяет исследовать распределение температур внутри и на поверхности изолированного проводника. Блок использует входные данные, такие как ток, температура окружающей среды, и внутренние параметры (Current_in, Ambient and Wire Temp_in) для расчета выделения тепла и температуры проводника и алгоритма управления (рис. 3). В ходе исследования на основе этого алгоритма и компьютерной модели были получены данные, позволяющие установить зависимость выделения количества теплоты от времени действия пожароопасного режима (перегрузки).

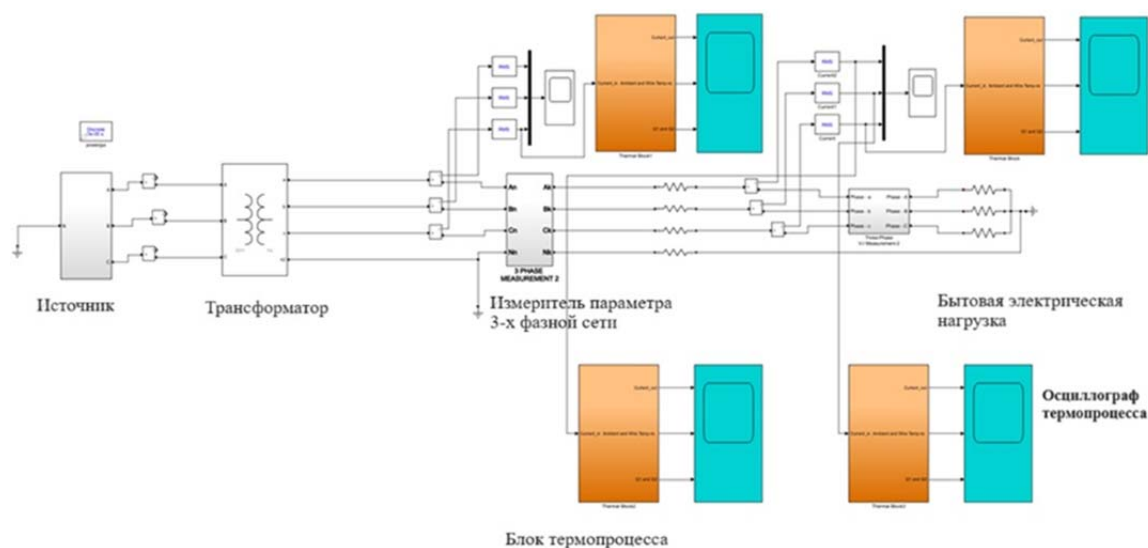


Рис. 1. Трехфазная модель распределительной сети напряжением 380 В

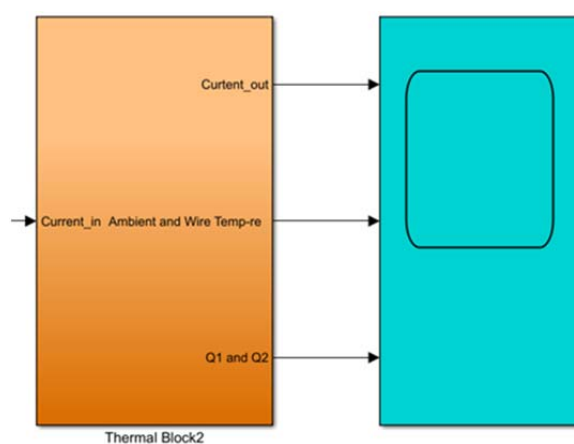


Рис. 2. Блок моделирования тепловых процессов

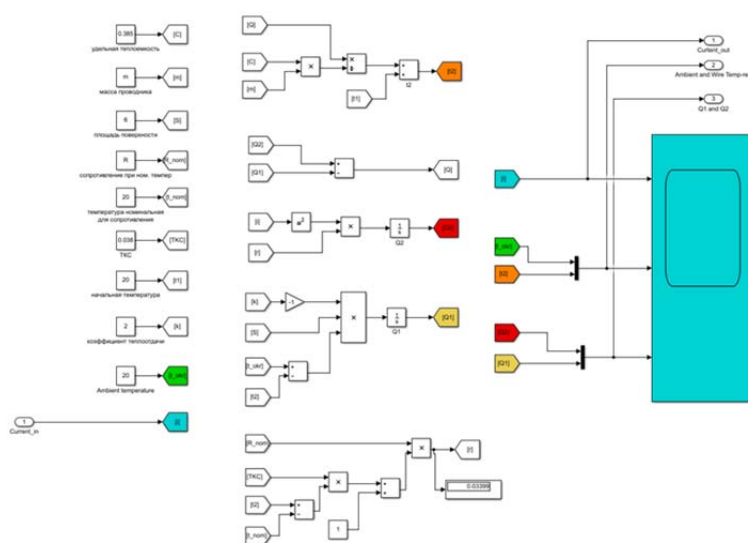


Рис. 3. Алгоритм управления блока моделирования тепловых процессов

В основу расчетов положены уравнения теплового баланса, описывающие нагрев проводника и теплоотдачу в окружающую среду:

$$P \cdot dt = m \cdot c \cdot d\tau + k \cdot F \cdot (\tau - \tau_{\text{окр.}}) \cdot dt,$$

где: P – мощность тепловыделения в проводнике при протекании электрического тока, Вт; dt – бесконечно малый интервал времени, в течение которого происходит процесс, с; m – масса нагреваемого тела (токоведущей жилы), кг; c – удельная теплоемкость материала проводника (для меди $c \approx 385 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$); $d\tau$ – изменение температуры проводника за время dt , К (или °С); k – коэффициент теплоотдачи от поверхности проводника в окружающую среду, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности охлаждения проводника, м²; τ – текущая температура проводника в данный момент времени, К (или °С); $\tau_{\text{окр.}}$ – температура окружающей среды, К (или °С); $(\tau - \tau_{\text{окр.}})$ – температурный напор (разность температур между проводником и средой), К (или °С).

Расчет сопротивления провода проводился с учетом температурного коэффициента меди по формуле:

$$r = R_{\text{ном}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T),$$

где: r – фактическое электрическое сопротивление проводника при текущей температуре, Ом; $R_{\text{ном}}$ – номинальное (начальное) сопротивление проводника при базовой температуре (обычно при 20°С), Ом; α – температурный коэффициент электрического сопротивления материала (для меди $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$), характеризует относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один градус; ΔT – изменение температуры проводника относительно базового значения ($T_{\text{текущ}} - T_{\text{базовая}}$), °С или К.

В ходе исследования на компьютерной модели получены данные (таблица), позволяющие установить зависимость выделения количества теплоты от времени действия пожароопасного режима (перегрузки).

Таблица

**Расчетные данные теплового режима
при увеличении нагрузки на 10 %, 20 %, 50 % и 80 % (Matlab)**

Отклонение от допустимой величины, %	Фактическая нагрузка, кВт	Допустимая нагрузка, кВт	Количество выделяемой энергии Q , Дж	Время процесса, сек.
10	11	10	$0,2 \cdot 10^5$	6,4
20	12	10	$0,32 \cdot 10^5$	9,5
50	15	10	$0,55 \cdot 10^5$	9,5
80	18	10	$2 \cdot 10^5$	24,3

В зависимости от фактической нагрузки квартир определяется сила тока, преобладающая в сети в установившемся режиме [4–6].

Согласно закону Джоуля-Ленца, время протекания аварийного режима рассчитывается как:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

$$\tau = \frac{Q}{I^2 \cdot R}.$$

Расчетное время протекания аварийного режима работы сети не только отвечает на вопросы пожарно-технической экспертизы, но и способствует выявлению преднамеренных признаков развития пожароопасного режима работы сети, проявляющегося в изменении структуры изоляции под действием токовых нагрузок.

Величины токов, при которых температура достигает максимального значения, в электротехнике известны как длительно допустимые токовые нагрузки для кабелей и проводов.

Срабатывание при достаточно большом токе обеспечивает протекание остаточного тока, кроме того, проектная нагрузка не учитывает особенности потребительского оснащения. Это ряд тех случаев, где не учитываются условия кондиционирования, наличие теплого пола и различных мощных электроприемников. Установленные параметры времени и токовые характеристики не способствуют решению важнейших задач при расследовании пожаров. Стоит отметить, что разрушение изоляции в коммунально-бытовых сетях путем нагревания проводников выделяемой энергией и протеканием сверхтока в проводнике контролировать силой тока не предоставляется возможным.

Время-токовая характеристика (характеристика расцепления) выключателя определяется условиями и значениями согласно характеристикам автомата защиты [7–11] и должна учитываться при расследовании пожара совместно с другими расчётными параметрами.

В таком случае, путем модели трёхфазной распределительной сети (описанной выше), были установлены параметры выделяющегося количества тепла при различных нагрузках в сети, где далее были рассчитаны временные характеристики протекания данного пожароопасного режима работы сети (табл.).

На рис. 4 представлен график зависимости времени достижения установившегося теплового режима от количества выделяемой энергии. Данная зависимость позволяет оценить степень термического воздействия на кабельную сеть при проведении экспертизы.

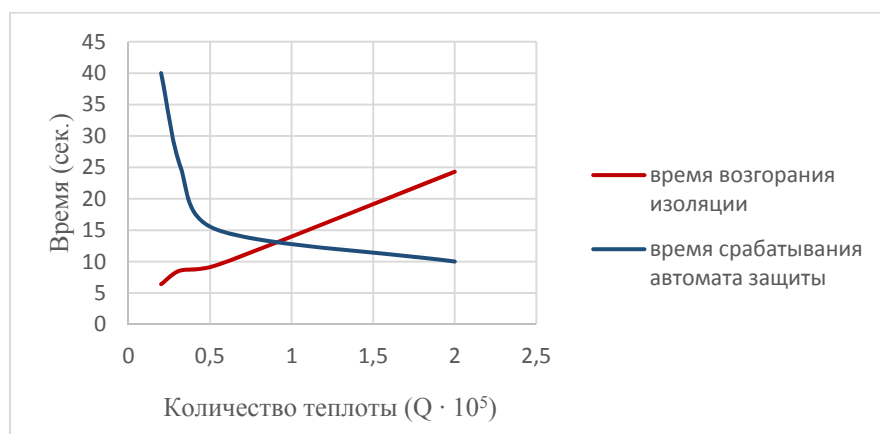


Рис. 4. График зависимости времени достижения установившегося теплового режима от количества выделяемой энергии

Для защиты сетей от сверхтоков используются автоматические выключатели. Согласно актуальному ГОСТ ИЕС 60898-1-2020, устройства класса В срабатывают при превышении номинального тока в 3–5 раз.

На рис. 5 приведено сравнение времени срабатывания защиты и времени достижения критического нагрева по кратности тока и тепла. Установлено, что при длительных перегрузках (более 20 сек.) тепловая энергия приводит к потере диэлектрических свойств изоляции, что является предвестником короткого замыкания.

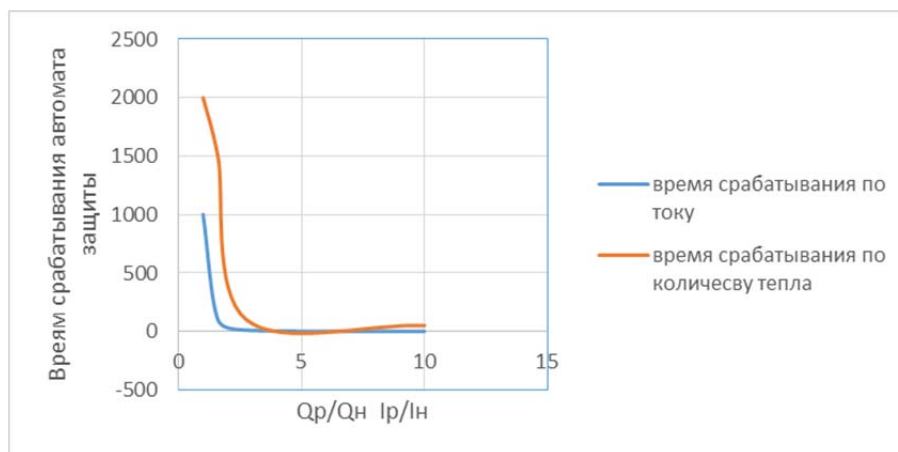


Рис. 5. Сравнение время-токовой характеристики срабатывания защиты и времени достижения критического нагрева по кратности тока и количества тепла

Именно данный тип отключается, если в момент повышения нагрузки значение силы тока превышает номинальное не более чем в 3–5 раза.

Согласно паспорту автоматического выключателя [10], определяющего время отключения автомата, строится зависимость в отношении кратности выделяющегося количества тепла и времени отключения автомата (рис. 5).

Здесь устанавливается, что, чем больше будет перегрузка (выделяемый ток), тем время срабатывания будет меньше. Это говорит о том, что в проводнике возникает достаточно большое выделение количества теплоты, следовательно, это может послужить причиной разрушения изоляции и потери свойств изоляционных материалов. При этом из-за длительности протекания тока (от 20 сек. и более) имеется вероятность возникновения короткого замыкания, что в последующем приведёт к пожару.

Далее приведен пример расчета величин для медного проводника сечением $2,5 \text{ мм}^2$ (наиболее распространенного в бытовых сетях) при нагрузке, превышающей номинальную.

Пример расчета параметров уравнения теплового баланса:

Для медного провода длиной $L=1 \text{ м}$ и сечением $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$:

1. Мощность тепловыделения (P).

Номинальный режим $I = 19 \text{ А}$ и удельное сопротивление меди $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,0175 \cdot \frac{1}{2,5} = 0,007 \text{ Ом},$$

$$P = I^2 \cdot R = 19^2 \cdot 0,007 = 2,53 \text{ Вт/м}.$$

2. Масса проводника (m).

Плотность меди $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$:

$$m = \gamma \cdot S \cdot L = 8900 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,02225 \text{ кг/м}.$$

3. Удельная теплоемкость (c).

Для меди табличное значение составляет:

$$c \approx 385 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

4. Коэффициент теплоотдачи (k) и площадь поверхности (F).

Для изолированного провода в спокойном воздухе коэффициент теплоотдачи $k \approx 10 \dots 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Диаметр жилы $d \approx 1,78$ мм, с учетом изоляции наружный диаметр $D \approx 3,4$ мм.

$$F = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 0,0034 \cdot 1 = 0,0107 \text{ м}^2/\text{м}.$$

Анализ установившейся температуры.

В установившемся режиме ($d\tau = 0$) вся выделяемая мощность уходит в окружающую среду:

$$P = k \cdot F \cdot (\tau - \tau_{\text{окр.}}).$$

Отсюда температура перегрева при $k = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $\tau_{\text{окр.}} = 20 ^\circ\text{C}$:

$$\tau = \tau_{\text{окр.}} + \frac{P}{k \cdot F} = 20 + \frac{2,53}{12 \cdot 0,0107} = 40 ^\circ\text{C}.$$

Результат: режим безопасен для ПВХ-изоляции (допустимый нагрев до $+70 ^\circ\text{C}$).

5. Режим перегрузки при несимметрии ($I = 45 \text{ A}$).

Мощность тепловыделения ($P \approx 14,2 \text{ Вт}/\text{м}$).

Температура жилы:

$$\tau = 20 + \frac{14,2}{12 \cdot 0,0107} \approx 130 ^\circ\text{C}.$$

Результат: температура превышает критический предел деформации изоляции ($+80 \dots +100 ^\circ\text{C}$). При сохранении такого режима в течение 24,3 сек. (табл.) происходит термическая деструкция диэлектрика.

Заключение

На основе разработанной модели тепловых процессов проведены исследования влияния несимметрии нагрузки на температурные режимы проводников до достижения установившегося нагрева.

Полученные зависимости позволяют определить время достижения критических температур изоляции в зависимости от кратности выделяемой энергии, что необходимо для идентификации технической причины пожара.

Показано, что при длительности протекания тока сверх допустимых значений (от 20 сек. и более) возникает высокая вероятность необратимой деструкции изоляции, создающая условия для возникновения пожароопасной ситуации.

Список источников

1. СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003 (утв. приказом Минстроя России от 3 дек. 2016 г. № 883/пр). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. ГОСТ 22483–2012. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров: межгосударственный стандарт. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. ГОСТ 31996–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ: межгосударственные. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Разработка виртуального тренажера исследования признаков аварийных режимов работы электрических приборов и оборудования / И.Н. Пожаркова [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 3 (26). С. 48–54. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.52.17.008

5. Оморов Т.Т., Тақырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93–102. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102

6. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 80–84.

7. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель изменения тока короткого замыкания с учётом нагрева проводника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 458–466. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-458-467

8. Степанов В.М., Базыль И.М., Ключникова А.Ю. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет снижения несимметрии напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 8–11. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-8-12

9. Технический паспорт выключателя автоматического серии ВА 47-29. М.: Торговый дом «Сфера». 4 с.

10. ГОСТ ИЕС 60898-1-2020. Выключатели автоматические для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Выключатели автоматические для переменного тока: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2020. 110 с.

11. Петрова Н.В., Лобова С.Ф., Гайдукевич А.Е. Анализ влияния несоблюдения противопожарных расстояний на распространение горения при производстве судебных нормативных пожарно-технических экспертиз // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 24–30.

References

1. SP 54.13330.2016. Zdaniya zhilye mnogokvartirnye. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 31-01-2003 (utv. prikazom Ministroya Rossii ot 3 dek. 2016 g. № 883/pr). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

2. GOST 22483–2012. Zhily tokoprovodyashchie dlya kabelej, provodov i shnurov: mezhgosudarstvennyj standart. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

3. GOST 31996–2012. Kabeli silovye s plastmassovoj izolyaciej na nominal'noe napryazhenie 0,66; 1 i 3 kV: mezhgosudarstvennyj standart. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

4. Razrabotka virtual'nogo trenazhera issledovaniya priznakov avarijnyh rezhimov raboty elektricheskix priborov i oborudovaniya / I.N. Pozharkova [i dr.] // Sibirskij požarno-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 3 (26). S. 48–54. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.52.17.008

5. Оморов Т.Т., Тақырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93–102. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102

6. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 80–84.

7. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель изменения тока короткого замыкания с учётом нагрева проводника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 458–466. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-458-467

8. Степанов В.М., Базыль И.М., Ключникова А.Ю. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет снижения несимметрии напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 8–11. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-8-12

9. Технический паспорт выключателя автоматического серии ВА 47-29. М.: Торговый дом «Сфера». 4 с.

10. GOST IEC 60898-1-2020. Vyklyuchateli avtomaticheskie dlya zashchity ot sverhtokov bytovogo i analogichnogo naznacheniya. Chast' 1. Vyklyuchateli avtomaticheskie dlya peremennogo toka: mezhgosudarstvennyj standart. M.: Standartinform, 2020. 110 s.

11. Petrova N.V., Lobova S.F., Gajdukevich A.E. Analiz vliyaniya nesoblyudeniya protivopozharnyh rasstoyanij na rasprostranenie goreniya pri proizvodstve sudebnyh normativnyh pozharo-tekhnicheskikh ekspertiz // Sibirskij pozharo-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 2 (25). S. 24–30.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.02.2026; одобрена после рецензирования: 17.04.2026; принята к публикации: 21.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 23.02.2026; approved after review: 17.04.2026; accepted for publication: 21.04.2026

Информация об авторах:

Полунин Георгий Александрович, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), кандидат технических наук, <https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Таваров Саиджон Ширалиевич, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), кандидат технических наук, доцент, e-mail: tabarovsaid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Information about authors:

Polunin Georgy A., associate professor of the department of life safety of South Ural State University (national research university) (454080, Chelyabinsk, Lenin ave., 76), candidate of technical sciences, <https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Tavarov Saidjon Sh., associate professor of the department of life safety of South Ural State University (national research university) (454080, Chelyabinsk, Lenin ave., 76), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: tabarovsaid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Аналитическая статья

УДК 614.842; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-40-49

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭВАКУАЦИИ ИЗ НОЧНЫХ КЛУБОВ ПРИ ПОЖАРАХ

✉ Джафарова Анастасия Алексеевна;

Маер Олег Михайлович;

Матвеев Александр Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ an.dzhafarova@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена высокой повторяемостью трагических пожаров в ночных клубах, сопровождающихся массовой гибелью людей, а также недостаточной эффективностью существующих систем обеспечения пожарной безопасности на объектах с особыми условиями эксплуатации. Цель исследования состоит в комплексном анализе проблем эвакуации людей при пожарах из ночных клубов, систематизация факторов, препятствующих безопасной эвакуации, и разработке рекомендаций по их устранению. В статье выявлены и систематизированы пять групп критических проблемных факторов (использование горючих материалов в отделке, архитектурные препятствия и эксплуатационные нарушения, поведенческие аспекты, низкая эффективность систем оповещения и управления эвакуацией, а также неадекватность существующих математических моделей эвакуации реальным условиям пожаров в ночных клубах). Для каждой группы предложены соответствующие пути решения. Практическая значимость состоит в разработке конкретных рекомендаций для повышения пожарной безопасности развлекательных заведений. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой и валидацией математических моделей эвакуации, учитывающих влияние алкоголя, панику и групповое поведение, проведением натурных экспериментов, а также созданием специализированных методик оценки пожарной безопасности для объектов клубного типа.

Ключевые слова: пожарная безопасность, эвакуация при пожаре, ночные клубы, человеческое поведение при пожаре, паника, математическое моделирование эвакуации, системы оповещения

Для цитирования: Джафарова А.А., Маер О.М., Матвеев А.В. Анализ проблем эвакуации из ночных клубов при пожарах // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 40–49. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-40-49

Analytical article

THE ANALYSIS OF NIGHTCLUB FIRE EVACUATION PROBLEMS✉ **Dzhafarova Anastasia A.;****Maer Oleg M.;****Matveev Alexander V.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ **an.dzhafarova@mail.ru**

Abstract. The relevance of the study is due to the high frequency of tragic fires in nightclubs that result in mass casualties, as well as the insufficient effectiveness of existing fire safety systems in facilities with special operating conditions. The purpose of the study is to comprehensively analyze the challenges of evacuating people from nightclubs during fires, identify the factors that hinder safe evacuation, and develop recommendations for their elimination. The article identifies and systematizes five groups of critical problem factors (the use of combustible materials in decoration, architectural obstacles and operational violations, behavioral aspects, the low efficiency of warning and evacuation control systems, and the inadequacy of existing mathematical models of evacuation to the real conditions of nightclub fires). Appropriate solutions are proposed for each group. The practical significance lies in the development of specific recommendations for improving the fire safety of entertainment venues. Further research prospects include the development and validation of mathematical evacuation models that take into account the effects of alcohol, panic, and group behavior, the conduct of field experiments, and the creation of specialized methods for assessing fire safety in club-type facilities.

Keywords: fire safety, fire evacuation, nightclubs, human behavior in a fire, panic, mathematical modeling of evacuation, and warning systems

For citation: Dzhafarova A.A., Maer O.M., Matveev A.V. The analysis of nightclub fire evacuation problems // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 40–49. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-40-49

Введение

Проблема обеспечения пожарной безопасности в ночных клубах приобретает особую актуальность в свете участившихся трагических происшествий, сопровождающихся значительным количеством человеческих жертв. Масштабные пожары в развлекательных заведениях становятся решающим фактором для переосмысления существующих подходов к обеспечению безопасности эвакуации и требуют комплексного анализа факторов, способствующих трагическим последствиям [1–3].

История пожаров в ночных клубах демонстрирует повторяющиеся закономерности. Пожар в пермском клубе «Хромая лошадь» в декабре 2009 г. унес жизни 156 чел., став одной из крупнейших трагедий в современной России. Спустя тринадцать лет, в ноябре 2022 г., в костромском клубе «Полигон» погибли 13 чел. при практически идентичных обстоятельствах. Совсем недавно, в январе 2026 г., пожар в швейцарском баре Le Constellation в новогоднюю ночь привел к гибели 40 чел., что вызвало массовые проверки заведений во Франции, где было выявлено несоответствие требованиям пожарной безопасности 44 % объектов из 443 проверенных [4].

Ночные клубы представляют собой особую категорию объектов с массовым пребыванием людей, характеризующихся специфическими условиями эксплуатации. Высокая плотность размещения посетителей, сложная планировочная структура помещений, использование специального светового и звукового оборудования, применение пиротехнических эффектов создают комплекс дополнительных рисков [2]. При этом психофизиологическое состояние посетителей существенно отличается от состояния людей в других общественных местах, что требует особого внимания при разработке мер пожарной безопасности и организации эвакуации.

Анализ произошедших трагедий показывает, что в большинстве случаев катастрофические последствия обусловлены не столько интенсивностью самого пожара, сколько комплексом факторов, препятствующих своевременной и безопасной эвакуации людей. Эти факторы носят технический, организационный и поведенческий характер, а их взаимное наложение создает критическую ситуацию, при которой время, необходимое для эвакуации, значительно превышает время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

Существующие методы проектирования систем пожарной безопасности и расчета времени эвакуации, основанные на математическом моделировании, не всегда адекватно отражают реальную ситуацию, складывающуюся при пожаре в ночном клубе. Это связано с ограничениями используемых моделей, которые недостаточно учитывают специфику поведения людей в условиях стрессовой ситуации, влияние алкогольного опьянения, эффекты паники и группового поведения. В результате принимаемые на стадии проектирования решения могут оказаться неэффективными в реальных условиях пожара.

Целью настоящего исследования является проведение комплексного анализа проблем, возникающих при эвакуации людей из ночных клубов в условиях пожара, систематизация основных проблемных факторов и разработка рекомендаций по их устранению. Достижение поставленной цели позволит сформировать научно обоснованный подход к повышению уровня пожарной безопасности развлекательных заведений и снижению риска массовой гибели людей при пожарах.

Аналитическая часть и результаты исследования

Проведенный анализ пожаров в ночных клубах позволил выделить пять основных групп проблемных факторов, критически влияющих на безопасность эвакуации людей. Каждая из этих групп характеризуется специфическими проявлениями и требует индивидуального подхода к разработке мер по их нейтрализации.

Первая группа проблем связана с широким использованием горючих материалов при внутренней отделке помещений ночных клубов. Анализ произошедших пожаров показывает, что именно применение легковоспламеняющихся отделочных материалов становится ключевым фактором быстрого распространения огня и интенсивного дымообразования. В случае пожара в клубе «Хромая лошадь» возгорание началось с потолочного декора из ивовых прутьев и холста, которые воспламенились от искр пиротехнического фейерверка [5]. Низкая высота потолка и использование горючих материалов привели к тому, что огонь охватил все помещение в течение нескольких минут, а образовавшийся едкий дым не позволял людям дышать. Стремление владельцев заведений к созданию эффектного интерьера часто приводит к применению декоративных элементов из материалов с высокими показателями горючести, воспламеняемости и дымообразующей способности. Текстильные драпировки, пластиковые панели, древесно-стружечные плиты, синтетические ковровые покрытия создают значительную пожарную нагрузку и способствуют быстрому развитию пожара. При этом в процессе горения таких материалов выделяются высокотоксичные продукты, что создает дополнительную угрозу для жизни людей [6].

Вторая группа проблем обусловлена архитектурными препятствиями и эксплуатационными нарушениями, которые существенно затрудняют процесс эвакуации [7]. Планировочные решения ночных клубов часто характеризуются сложной конфигурацией помещений с большим количеством коридоров, переходов и изолированных зон. Неоднократные реконструкции и перепланировки, проводимые без надлежащего согласования с надзорными органами, приводят к образованию тупиковых участков и сокращению количества эвакуационных выходов. В обоих случаях пожаров в российских клубах эвакуация была затруднена из-за заблокированных или закрытых на замок аварийных выходов. В костромском клубе «Полигон» посетители столкнулись с ситуацией, когда большинство эвакуационных выходов оказались заблокированы, и только благодаря решительным действиям одного из посетителей, выбившего запертую дверь, удалось спасти многих людей [2]. Загромождение путей эвакуации оборудованием, мебелью и другими предметами создает физические препятствия для движения людского потока. Недостаточная ширина проходов и дверных проемов, наличие порогов и ступеней, отсутствие аварийного

освещения усугубляют ситуацию. Размещение клубов в подвальных помещениях создает дополнительные риски, так как пути эвакуации направлены вверх, что замедляет движение людей и способствует скоплению продуктов горения в зоне эвакуации.

Третья группа факторов связана с поведенческими аспектами и влиянием алкоголя на процесс эвакуации. Психофизиологическое состояние посетителей ночных клубов существенно отличается от состояния людей в других общественных местах [8, 9]. Алкогольное опьянение снижает скорость реакции, нарушает координацию движений, ухудшает способность к принятию адекватных решений в стрессовой ситуации. Исследования показывают, что люди в состоянии алкогольного опьянения могут не воспринимать сигналы опасности с должной серьезностью, что приводит к задержке начала эвакуации. Кроме того, высокий уровень шума в ночных клубах затрудняет восприятие сигналов тревоги и голосовых команд персонала. Возникновение паники является одним из наиболее опасных явлений при пожаре в местах массового скопления людей [10]. Паника представляет собой массовое психологическое состояние, характеризующееся неконтролируемым страхом и стремлением к бегству [11]. В условиях ограниченной видимости из-за дыма, при отключении основного освещения паника приводит к давке у выходов, в результате которой люди получают травмы или гибнут. При пожаре в клубе «Хромая лошадь» после выключения света возникла паника и давка среди посетителей, что существенно затруднило спасение людей. Персонал клуба не смог организовать эвакуацию, не препятствовал давке в коридоре и у входа, не проинформировал посетителей о наличии дополнительных выходов. Типичной реакцией людей в состоянии паники является стремление покинуть помещение через тот же выход, через который они вошли, даже если существуют альтернативные пути эвакуации [12, 13].

Четвертая проблема заключается в низкой эффективности систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Автоматические системы пожарной сигнализации и оповещения, установленные в ночных клубах, не всегда обеспечивают своевременное и эффективное информирование посетителей о возникшей опасности. Звуковые сигналы тревоги могут быть не услышаны из-за громкой музыки, а световые индикаторы теряются в общем световом оформлении зала. Отсутствие четких и понятных голосовых сообщений, направляющих людей к эвакуационным выходам, приводит к хаотичному движению и скоплению людей в определенных зонах. Недостаточная подготовка персонала к действиям в чрезвычайных ситуациях усугубляет проблему. Работники клубов часто не знают порядка действий при пожаре, не умеют использовать первичные средства пожаротушения, не способны организовать эвакуацию посетителей и предотвратить возникновение паники. В некоторых случаях персонал сам оказывается в состоянии растерянности и покидает помещение, не предприняв попыток оповещения и спасения посетителей.

Пятая группа проблем связана с обоснованностью принятия организационно-проектных решений при проектировании систем пожарной безопасности из-за низкой адекватности математического моделирования процессов эвакуации. Существующие программные комплексы для расчета времени эвакуации основаны на упрощенных моделях движения людских потоков, которые не учитывают множество реальных факторов, влияющих на процесс эвакуации в условиях пожара в ночном клубе [14–17]. Индивидуально-поточная и упрощенная аналитическая модели движения людей предполагают рациональное поведение эвакуирующихся, равномерное распределение людского потока по всем доступным путям эвакуации, постоянную скорость движения [18]. В реальности же поведение людей при пожаре в значительной степени определяется эмоциональным состоянием, наличием или отсутствием информации о путях эвакуации, влиянием алкоголя [7]. Модели не учитывают возможность возникновения паники, формирования заторов и скоплений людей, обратного движения против общего потока. Кроме того, существующие модели не позволяют адекватно оценить влияние дыма и продуктов горения на скорость движения людей и время принятия решений. В результате проектные решения, принятые на основе расчетов с использованием таких моделей, могут не обеспечивать требуемый уровень безопасности при реальном пожаре [19, 20].

Систематизация выявленных проблем и путей их решения представлена в таблице.

Таблица

Проблемы при эвакуации и пути их решений

Проблемный фактор	Пути решения
Использование горючих материалов при отделке помещений	Нормативное ограничение применения горючих материалов на путях эвакуации. Использование материалов не ниже класса КМ2 для отделки стен и потолков, КМ4 для отделки полов. Обязательная огнезащитная обработка деревянных конструкций, текстильных драпировок и декоративных элементов с периодическим контролем эффективности защиты [21]. Запрет использования в отделке материалов с высокой токсичностью продуктов горения
Архитектурные препятствия и эксплуатационные нарушения	Обеспечение не менее двух эвакуационных выходов из каждого помещения, размещенных в противоположных сторонах. Обязательное наличие фотолюминесцентных планов эвакуации и указателей [22]. Установка систем аварийного освещения с автономным питанием. Регулярный контроль состояния путей эвакуации. Ограничение размещения ночных клубов в подвальных помещениях
Поведенческие аспекты и влияние алкоголя на эвакуацию	Ограничение максимально допустимого количества посетителей в зависимости от пропускной способности путей эвакуации с учетом сниженной скорости движения. Разработка специальных алгоритмов работы систем оповещения, учитывающих психологические особенности восприятия информации в условиях алкогольного опьянения и высокого уровня шума. Обязательное проведение регулярных тренировок персонала по организации эвакуации и предотвращению паники
Низкая эффективность систем оповещения и управления эвакуацией	Внедрение интегрированных систем оповещения и управления эвакуацией пятого типа с автоматическим снижением уровня музыки и трансляцией голосовых сообщений [23]. Использование визуальных средств оповещения, в том числе проекционных систем и светодиодных экранов. Обязательное обучение всего персонала действиям при пожаре с проведением практических тренировок не реже одного раза в полугодие. Назначение ответственных лиц из числа персонала на каждый участок помещения
Низкая адекватность моделирования эвакуации при принятии проектных решений	Совершенствование математических моделей эвакуации с включением факторов, учитывающих психофизиологическое состояние людей, влияние алкоголя, возможность возникновения паники [24, 25]. Проведение натурных экспериментов и сбор статистических данных о реальном поведении людей. Разработка специализированных моделей для расчета эвакуации из ночных клубов. Введение повышающих коэффициентов к расчетному времени эвакуации. Обязательная верификация результатов моделирования путем проведения учебных эвакуаций

Анализ предложенных путей решения выявленных проблем показывает, что повышение уровня пожарной безопасности ночных клубов требует комплексного подхода, охватывающего технические, организационные и методологические аспекты. Изолированное применение отдельных мер не способно обеспечить требуемый уровень защиты, поскольку проблемы тесно взаимосвязаны и взаимно усиливают друг друга [7].

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить и систематизировать основные проблемные факторы, препятствующие безопасной эвакуации людей из ночных клубов при пожаре. Анализ трагических происшествий в развлекательных заведениях демонстрирует устойчивую повторяемость одних и тех же причин, приводящих к массовой гибели людей [2]. Это свидетельствует о системном характере проблемы и необходимости выработки принципиально новых подходов к обеспечению пожарной безопасности данной категории объектов.

Основными выводами исследования являются следующие положения:

1. Использование горючих материалов при отделке помещений ночных клубов создает критические условия для быстрого развития пожара и блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в течение нескольких минут после возникновения возгорания. Необходимо ужесточение нормативных требований к применению отделочных материалов с обязательным контролем их пожарно-технических характеристик на стадии ввода объекта в эксплуатацию и в процессе функционирования.

2. Архитектурные препятствия и эксплуатационные нарушения, в частности блокирование эвакуационных выходов, загромождение путей эвакуации, сложная планировочная структура помещений, являются прямым следствием недостаточного контроля со стороны надзорных органов и пренебрежения требованиями пожарной безопасности со стороны владельцев заведений. Необходимо усиление административной ответственности за нарушения требований пожарной безопасности и введение практики регулярных внеплановых проверок.

3. Поведенческие аспекты и влияние алкоголя на процесс эвакуации представляют собой специфическую проблему, характерную именно для ночных клубов. Существующие подходы к расчету времени эвакуации не учитывают данный фактор, что приводит к существенному расхождению между расчетными и реальными показателями. Требуется разработка специальных методик оценки влияния психофизиологического состояния людей на параметры эвакуации с последующим включением полученных данных в нормативную базу.

4. Низкая эффективность систем оповещения и недостаточная подготовка персонала к действиям в чрезвычайных ситуациях значительно увеличивают время начала эвакуации и снижают ее организованность. Необходимо внедрение современных интегрированных систем оповещения и управления эвакуацией, адаптированных к специфике ночных клубов, а также обязательное регулярное обучение персонала с практической отработкой действий при пожаре.

5. Существующие математические модели эвакуации обладают существенными ограничениями и не позволяют адекватно прогнозировать реальное развитие ситуации при пожаре в ночном клубе. Это приводит к принятию проектных решений, которые формально соответствуют нормативным требованиям, но не обеспечивают безопасность людей в реальных условиях. Необходимо совершенствование методов моделирования с учетом специфики объектов данного типа и проведение валидации моделей на основе результатов натурных экспериментов.

Следует отметить, что проблема безопасности эвакуации из ночных клубов при пожаре носит междисциплинарный характер и требует объединения усилий специалистов в области пожарной безопасности, архитектуры, психологии, математического моделирования. Только комплексный подход, основанный на глубоком понимании всех аспектов проблемы, позволит разработать эффективные меры по предотвращению трагедий и сохранению человеческих жизней.

Список источников

1. Подмарков В.В., Иванов А.В., Лукашина И.Е. Анализ обеспечения пожарной безопасности торгово-развлекательных центров // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2021. № 4 (40). С. 32–36. EDN LYJWXT
2. Задурова А.А., Матвеев А.В., Смирнов А.С. Анализ пожаров на объектах с массовым пребыванием людей на примере ночных клубов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 1. С. 20–28. EDN RHQLEI
3. Савчук О.Н., Степанов Р.В. Пути снижения риска опасности для населения при пожарах в торгово-развлекательных центрах // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 1 (45). С. 15–24. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-15-24 EDN XNDJDJ
4. Purdy N. The tragedy of Crans-Montana: what the voice of a fire chief teaches us about trauma, solidarity and pastoral care // Pastoral Care in Education. 2026. P. 1–3.
5. Брыгин Ю.П. О причинах и уроках трагичного пожара в пермском клубе «Хромая лошадь» // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 4. С. 26–35. DOI: 10.25257/FE.2024.4.26-35 EDN QEAKLW
6. Джафарова А.А. Оценка распространения опасных факторов пожара в ночном клубе // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 1 (45). С. 7–14. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-7-14 EDN MZFGIA
7. Задурова А.А. Моделирование эвакуации при пожаре в ночном клубе на основе байесовской сети // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 2. С. 154–162. EDN MVPNKV
8. Джафарова А.А., Матвеев А.В. Исследование особенностей поведения людей при пожарах в учреждениях клубного типа // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 3 (51). С. 54–63. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-54-63 EDN FDEFPG
9. Джафарова А.А. Исследование поведенческих факторов влияния на эффективность эвакуации при пожарах: обзор исследований // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 1 (49). С. 31–45. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-31-45 EDN NNDFSK
10. Коткова Е.А. Системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации из общественных зданий // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 1. С. 182–194. EDN TITMЕС
11. Матвеев А.В., Коткова Е.А. Психофизиологические аспекты поведения людей при эвакуации в случае пожара // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. Иваново, 2020. С. 379–381. EDN KENVKI
12. Коткова Е.А. Модель нейронной сети для прогнозирования предэвакуационного поведения людей при пожаре // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 2 (38). С. 66–72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72 EDN UBIKMZ
13. Беляева К.С., Матвеев А.В. Структурная схема мультиагентного моделирования поведения людей при эвакуации в чрезвычайных ситуациях // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 70–73. EDN YXLMXZ
14. Модель системы управления аварийной эвакуацией на объектах с массовым пребыванием людей / А.В. Матвеев [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2011. № 4. С. 10–16. EDN PFFRGV
15. Матвеев А.В., Ефремов С.В. Модель процесса аварийной эвакуации из здания в случае пожара при нестационарном потоке людей // Безопасность жизнедеятельности. 2013. № 2 (146). С. 46–50. EDN PVOZKT

16. Стольников Л.Г., Матвеев А.В. Имитационная модель эвакуации людей из здания в случае пожара // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 81–86. EDN RQOLIL
17. Агентное моделирование процесса эвакуации людей при пожарах в зданиях: обзор подходов и исследований / Е.А. Коткова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 10. С. 55–62. DOI: 10.17513/snt.39791 EDN CZHEJY
18. Matveev A.V., Maximov A.V., Zadurova A.A. Simulation Model of Emergency Evacuation in Case of Fire in a Nightclub // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vladivostok, 2021. P. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012019 EDN FMACZD
19. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре с использованием агентно-ориентированного подхода // Инженерный вестник Дона. 2023. № 8 (104). С. 231–243. EDN LGEVSX
20. Джафарова А.А., Матвеев А.В. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. Т. 32. № 1. С. 107–120. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.46.68.012 EDN PCDWJC
21. Пузач С.В., Комаревцев Н.В. Система градации строительных материалов по токсичности продуктов горения для оценки условия выполнения безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2025. № 2. С. 16–25. DOI: 10.25257/FE.2025.2.16-25 EDN NTYKSF
22. Иваницкий А.Г., Шалавинский А.С. Обеспечение успешной эвакуации людей с использованием сигнальной разметки // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2025. Т. 9. № 2. С. 214–229. DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.214 EDN GLIYXO
23. Мельников Г.О., Турсенев С.А. Интеграция технологии искусственного интеллекта для повышения эффективности эвакуации людей при пожаре // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 4 (48). С. 30–36. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-4-30-36 EDN DDHLPZ
24. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Методика интеллектуального прогнозирования эффективности управления эвакуацией людей из общественных зданий // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 4. С. 107–120. EDN PLARHX
25. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Структурная схема системы интеллектуального управления эвакуацией // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2024. № 2. С. 62–69. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2-62-69 EDN VINYXR

References

1. Podmarkov V.V., Ivanov A.V., Lukashina I.E. Analiz obespecheniya pozharnoj bezopasnosti trgovovo-razvlekatel'nyh centrov // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2021. № 4 (40). S. 32–36. EDN LYJWXT
2. Zadurova A.A., Matveev A.V., Smirnov A.S. Analiz pozharov na ob"ektah s massovym prebyvaniem lyudej na primere nochnyh klubov // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2020. № 1. S. 20–28. EDN RHQLEI
3. Savchuk O.N., Stepanov R.V. Puti snizheniya riska opasnosti dlya naseleniya pri pozharah v trgovovo-razvlekatel'nyh centrakh // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 1 (45). S. 15–24. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-15-24 EDN XNDJDJ
4. Purdy N. The tragedy of Crans-Montana: what the voice of a fire chief teaches us about trauma, solidarity and pastoral care // Pastoral Care in Education. 2026. P. 1–3.

5. Brygin Yu.P. O prichinah i urokah tragicznogo pozhara v permskom klube «Hromaya loshad'» // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2024. № 4. S. 26–35. DOI: 10.25257/FE.2024.4.26-35 EDN QEAKLW
6. Dzhaferova A.A. Ocenka rasprostraneniya opasnykh faktorov pozhara v nochnom klube // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 1 (45). S. 7–14. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-1-7-14 EDN MZFGIA
7. Zadurova A.A. Modelirovanie evakuacii pri pozhare v nochnom klube na osnove bajesovskoj seti // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2022. № 2. S. 154–162. EDN MVPNKV
8. Dzhaferova A.A., Matveev A.V. Issledovanie osobennostej povedeniya lyudej pri pozharah v uchrezhdeniyah klubnogo tipa // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2024. № 3 (51). S. 54–63. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-54-63 EDN FDEFPG
9. Dzhaferova A.A. Issledovanie povedencheskich faktorov vliyaniya na effektivnost' evakuacii pri pozharah: obzor issledovanij // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2024. № 1 (49). S. 31–45. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-31-45 EDN NNDFSK
10. Kotkova E.A. Sistemno-dinamicheskaya model' rasprostraneniya paniki pri evakuacii iz obshchestvennykh zdaniy // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2022. № 1. S. 182–194. EDN TITMEC
11. Matveev A.V., Kotkova E.A. Psihofiziologicheskie aspekty povedeniya lyudej pri evakuacii v sluchae pozhara // Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii: sb. materialov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ivanovo, 2020. S. 379–381. EDN KEHVKI
12. Kotkova E.A. Model' nejronnoj seti dlya prognozirovaniya predevakuacionnogo povedeniya lyudej pri pozhare // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2022. № 2 (38). S. 66–72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72 EDN UBIKMZ
13. Belyaeva K.S., Matveev A.V. Strukturnaya skhema mul'tiagentnogo modelirovaniya povedeniya lyudej pri evakuacii v chrezvychajnykh situacijah // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnykh situacij. 2018. T. 1. S. 70–73. EDN YXLMXZ
14. Model' sistemy upravleniya avarijnoj evakuaciej na ob'ektah s massovym prebyvaniem lyudej / A.V. Matveev [i dr.] // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2011. № 4. S. 10–16. EDN PFFRGV
15. Matveev A.V., Efremov S.V. Model' processa avarijnoj evakuacii iz zdaniya v sluchae pozhara pri nestacionarnom potoke lyudej // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2013. № 2 (146). S. 46–50. EDN PVOZKT
16. Stol'nikova L.G., Matveev A.V. Imitacionnaya model' evakuacii lyudej iz zdaniya v sluchae pozhara // Teoreticheskie i prikladnye voprosy kompleksnoj bezopasnosti: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 2018. S. 81–86. EDN RQOLIL
17. Agentnoe modelirovanie processa evakuacii lyudej pri pozharah v zdaniyah: obzor podhodov i issledovanij / E.A. Kotkova [i dr.] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2023. № 10. S. 55–62. DOI: 10.17513/snt.39791 EDN CZHEJY
18. Matveev A.V., Maximov A.V., Zadurova A.A. Simulation Model of Emergency Evacuation in Case of Fire in a Nightclub // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vladivostok, 2021. P. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012019 EDN FMACZD
19. Kotkova E.A., Matveev A.V. Metod ocenki effektivnosti organizacii evakuacii lyudej iz obshchestvennogo zdaniya pri pozhare s ispol'zovaniem agentno-orientirovannogo podhoda // Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 8 (104). S. 231–243. EDN LGEVSX

20. Dzhaferova A.A., Matveev A.V. Algoritm intellektual'noj podderzhki prinyatiya organizacionno-proektnyh reshenij po upravleniyu effektivnost'yu evakuacii iz uchrezhdenij klubnogo tipa // Sibirskij pozharo-spasatel'nyj vestnik. 2024. T. 32. № 1. S. 107–120. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.46.68.012 EDN PCDWJC

21. Puzach S.V., Komarevcev N.V. Sistema gradacii stroitel'nyh materialov po toksichnosti produktov goreniya dlya ocenki usloviya vypolneniya bezopasnoj evakuacii lyudej pri pozhare // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2025. № 2. S. 16–25. DOI: 10.25257/FE.2025.2.16-25 EDN NTYKSF

22. Ivanickij A.G., Shalavinskij A.S. Obespechenie uspeshnoj evakuacii lyudej s ispol'zovaniem signal'noj razmetki // Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. 2025. T. 9. № 2. S. 214–229. DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.214 EDN GLIYXO

23. Mel'nikov G.O., Tursenev S.A. Integraciya tekhnologii iskusstvennogo intellekta dlya povysheniya effektivnosti evakuacii lyudej pri pozhare // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 4 (48). S. 30–36. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-4-30-36 EDN DDHLPZ

24. Kotkova E.A., Matveev A.V. Metodika intellektual'nogo prognozirovaniya effektivnosti upravleniya evakuaciej lyudej iz obshchestvennyh zdaniy // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2021. № 4. S. 107–120. EDN PLARHX

25. Kotkova E.A., Matveev A.V. Strukturnaya skhema sistemy intellektual'nogo upravleniya evakuaciej // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2024. № 2. S. 62–69. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2-62-69 EDN VINYXR

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 05.05.2026; одобрена после рецензирования: 15.06.2026; принята к публикации: 16.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 05.05.2026; approved after review: 15.06.2026; accepted for publication: 16.06.2026

Информация об авторах:

Джафарова Анастасия Алексеевна, преподаватель кафедры прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: an.dzhaferova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7878-9193>, SPIN-код: 5307-6354

Маер Олег Михайлович, начальник кафедры надзорной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат экономических наук, e-mail: oleg.maer.84@mail.ru, SPIN-код: 6979-7289

Матвеев Александр Владимирович, заведующий кафедрой прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: fcvega_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN-код: 5778-8821

Information about the authors:

Dzhaferova Anastasia A., lecturer at the department of applied mathematics and information technology security of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: an.dzhaferova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7878-9193>, SPIN: 5307-6354

Maer Oleg M., head of the department of supervisory activities of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of economic sciences, e-mail: oleg.maer.84@mail.ru, SPIN: 6979-7289

Matveev Alexander V., head of the department of applied mathematics and information technology security of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: fcvega_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN: 5778-8821

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 005.7+004.8+519.7+519.2+004.94; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-50-64

ИННОВАЦИОННАЯ ОРГАНИЗАЦИОННАЯ КУЛЬТУРА КАК АНТИЭНТРОПИЙНЫЙ МЕХАНИЗМ ОРГАНИЗАЦИИ: ОТ ЭЛИТАРНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ К РАСПРЕДЕЛЁННОЙ КОГНИТИВНОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Ройзен Александр Моисеевич.

Ассоциация радио-электрофизиков, Саратов, Россия.

✉ Мусиенко Тамара Викторовна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ tvm77777@mail.ru

Аннотация. Представлено системное исследование трансформации управленческих моделей в условиях экспоненциального роста сложности глобальной информационной среды, вызывающего кризис классических иерархических структур.

Цель статьи заключается в разработке теоретико-методологического подхода к интерпретации инновационной организационной культуры как антиэнтропийного механизма обеспечения управляемости сложных систем и в теоретическом обосновании перехода к распределённой когнитивной архитектуре управления. Исследование основано на синтезе кибернетического и системного подходов. В работе применяется концепция информационной энтропии К. Шеннона и закон необходимого разнообразия У.Р. Эшби для анализа когнитивных пределов централизованных иерархических структур.

Установлено, что кризис современных организаций во многом связан с ограниченной пропускной способностью централизованных когнитивных контуров управления в условиях роста внешней и внутренней сложности. Показано, что сохранение управляемости требует расширения регулятивного разнообразия системы, в том числе через развитие переходных форм координации, основанных на сочетании регламентированности и распределённого участия. Разработана концептуальная модель эволюции управленческой системы от закрытой элитарной структуры через институционально упорядоченные переходные формы координации к распределённой когнитивной архитектуре, в которой инновационная организационная культура выступает антиэнтропийным механизмом согласования интеллектуальных ресурсов. Обоснована роль искусственного интеллекта как дополнительного когнитивного модуля, усиливающего возможности координации и адаптации организации.

Научная новизна исследования заключается в том, что инновационная организационная культура впервые интерпретирована не только как ценностно-поведенческий феномен, но и как антиэнтропийный механизм обеспечения управляемости сложных организационных систем. Сформулирована концепция эволюционного перехода от элитарной модели управления через институционально упорядоченные формы координации к распределённой когнитивной архитектуре, создающей предпосылки для повышения устойчивости организации в условиях информационной перегрузки и роста организационной сложности.

Ключевые слова: управленческая энтропия, организационная сложность, закон необходимого разнообразия, системная устойчивость, цифровая трансформация, искусственный интеллект, гибридные интеллектуальные системы, внутренняя симметрия

Для цитирования: Ройзен А.М., Мусиенко Т.В. Инновационная организационная культура как антиэнтропийный механизм организации: от элитарной модели управления к распределённой когнитивной архитектуре // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 50–64. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-50-64

Scientific article

INNOVATIVE ORGANIZATIONAL CULTURE AS AN ANTI-ENTROPY MECHANISM OF ORGANIZATION: FROM AN ELITE MANAGEMENT MODEL TO A DISTRIBUTED COGNITIVE ARCHITECTURE

Royzen Alexander M.

Association of Radio-Electrophysicists, Saratov, Russia.

✉ **Musienko Tamara V.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ **tvm77777@mail.ru**

Abstract. This article presents a systems-based study of the transformation of management models in the context of the exponential growth in complexity of the global information environment, which is causing a crisis in traditional hierarchical structures.

The purpose of the article is to develop a theoretical and methodological approach to the interpretation of innovative organizational culture as an anti-entropic mechanism for ensuring the controllability of complex systems and to theoretically justify the transition to a distributed cognitive management architecture.

The study is based on a synthesis of cybernetic and systems approaches. The paper applies Shannon's concept of information entropy and W.R. Ashby's law of requisite variety to analyze the cognitive limitations of centralized hierarchical structures.

It has been established that the crisis of modern organizations is largely associated with the limited processing capacity of centralized cognitive control loops under conditions of increasing external and internal complexity. It has been shown that maintaining controllability requires expanding the system's regulatory variety, including through the development of transitional forms of coordination based on a combination of formal regulation and distributed participation. A conceptual model has been developed for the evolution of a management system from a closed elite structure through an institutionally ordered transitional form to a distributed cognitive architecture, in which innovative organizational culture serves as an anti-entropic mechanism for aligning intellectual resources. The role of artificial intelligence as an additional cognitive module that enhances the organization's coordination and adaptation capabilities has been substantiated.

For the first time, innovative organizational culture is considered not as a psychological motivational resource, but as a structural mechanism for counteracting entropy. The study formulates a concept for the transition from an elite management model to a distributed cognitive architecture, which increases the organization's resilience to extreme information overload.

Keywords: managerial entropy, organizational complexity, law of requisite variety, systemic sustainability, digital transformation, artificial intelligence, hybrid intelligent systems, internal symmetry

For citation: Royzen A.M., Musienko T.V. Innovative organizational culture as an anti-entropy mechanism of organization: from an elite management model to a distributed cognitive architecture // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 50–64. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-50-64

Введение

Актуальность. Современные организационные системы входят в фазу, в которой рост сложности внешней и внутренней среды начинает опережать когнитивную и регулятивную способность классических иерархий. Традиционные механизмы управления сталкиваются уже не просто со снижением эффективности, а с угрозой потери управляемости: объём различий, подлежащих интерпретации и координации, превышает пропускную способность централизованного управляющего контура. Как показывают эмпирические исследования, в условиях экспоненциального роста информационных потоков организации всё чаще испытывают состояние «коллективной когнитивной перегрузки» (collective attention overload), при котором способность системы выделять значимые сигналы и координировать действия резко снижается [1]. В этих условиях меняется и само понимание инновационной организационной культуры. Проблема смещается из плоскости стимулирования новизны в плоскость удержания управляемости: организация должна не только производить новое, но и перерабатывать нарастающую сложность без распада координационных и смысловых связей.

Степень разработанности проблемы. Проблематика инновационной организационной культуры уже рассматривалась авторами ранее в работах [2–4], где были систематизированы основные теоретические подходы к её исследованию. В существующей литературе, восходящей к работам Э. Шейна [5], Г. Хофстеде [6], Т. Амабайл [7] и др., инновационная культура преимущественно интерпретируется как совокупность норм, ценностей [8, 9], лидерских практик [10] и моделей взаимодействия, стимулирующих или препятствующих созданию и внедрению нового [11–16]. Однако классические и неоклассические модели обнаруживают свои пределы там, где главная проблема связана уже не с дефицитом креативности как таковой, а с неспособностью организации перерабатывать нарастающую сложность. Когда объём различий, подлежащих интерпретации, согласованию и координации, превышает пропускную способность централизованного управляющего ядра, прежние механизмы начинают производить управленческий шум, запаздывания и смысловые разрывы. В этой точке исследование требует иного понятийного аппарата, позволяющего рассматривать инновационную организационную культуру не только как ресурс новизны, но и как механизм удержания системной связности.

Современные зарубежные исследования также фиксируют растущий интерес к проблеме распределения когнитивной нагрузки в организациях. В частности, в работах по гибридным командам «человек – искусственный интеллект (ИИ)» отмечается, что ИИ может выступать не просто инструментом автоматизации, а активным агентом, перераспределяющим когнитивные задачи и изменяющим саму архитектуру коллективного познания [17]. Вместе с тем, системное применение закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби [18] к анализу организационной культуры остаётся фрагментарным и требует дальнейшей теоретической разработки, а концепция антиэнтропийного механизма применительно к культуре инноваций практически не разработана, хотя отдельные кейсы (например, управленческая философия Amazon) уже демонстрируют востребованность такого подхода [19].

Проблема исследования. Ключевая проблема заключается в следующем: сохраняющаяся элитарная модель управления (концентрация интерпретации, инициативы и принятия решений в узком центре) в условиях экспоненциального роста сложности порождает рост управленческой энтропии – несоразмерности между сложностью среды и возможностями организации её перерабатывать. В кибернетической перспективе У. Эшби [18] эта ситуация может быть описана как нарушение внутренней симметрии управления, то есть как разрыв между разнообразием среды и мощностью управляющего контура. Если данный разрыв становится устойчивым, организация сталкивается с необходимостью не частичной реформы, а более глубокого структурного сдвига – перехода к иной топологии координации. Это делает неизбежным поиск новых механизмов поддержания организационной связности.

Цель исследования состоит в разработке теоретико-методологического подхода к переосмыслению инновационной организационной культуры как антиэнтропийного механизма обеспечения управляемости сложных систем и в обосновании перехода от элитарной модели управления к распределённой когнитивной архитектуре в условиях нарастающей турбулентности внешней среды.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Выявить когнитивные пределы централизованных иерархических структур в условиях роста организационной сложности.

2. Обосновать применение энтропийно-кибернетического инструментария (К. Шеннон [20], У.Р. Эшби [18], И. Пригожин [21]) для анализа управленческой энтропии.

3. Сформулировать концепцию перехода от элитарной модели к распределённой когнитивной архитектуре как способа восстановления кибернетической соразмерности между сложностью среды и разнообразием регулятора.

4. Определить место ИИ и феномена «внутренней симметрии» в новой архитектуре организационной когниции.

В исследовании учтены работы, раскрывающие психологические аспекты организационной и психологической энтропии, а также специфику распределённых когнитивных процессов в условиях неопределённости [22–26].

Теоретическая значимость. В статье впервые инновационная организационная культура интерпретируется не как психологический ресурс мотивации, а как структурный антиэнтропийный оператор, обеспечивающий перераспределение когнитивной нагрузки и поддержание системной связности. Такой сдвиг в статье обозначается как переход к распределённой когнитивной архитектуре, при которой интерпретация, инициирование решений и переработка знания перестают быть монополией узкого центра и распределяются между множеством взаимосвязанных контуров. Этот переход, в свою очередь, невозможен без антропологической трансформации субъекта организационного действия: изменения способов участия, распределения инициативы, отношения к авторитету и взаимодействия человека с интеллектуальными системами.

Структура статьи. Статья включает: обзор теоретико-методологических подходов к анализу инновационной культуры; обоснование кризиса элитарной модели управления; энтропийно-кибернетическую интерпретацию организационной сложности (с привлечением формул Шеннона, закона Эшби и фазовых портретов); анализ роли ИИ как новой размерности организационной архитектуры; заключение с выводами и перспективами исследования.

Методы исследования

Методологическая архитектура настоящего исследования обусловлена его междисциплинарным характером и необходимостью преодоления ограничений классических линейных моделей анализа организационных систем. Исследование базируется на синтезе трёх ключевых теоретических платформ: общей теории систем (Л. фон Берталанфи) [27], кибернетики (У.Р. Эшби) [18] и синергетики (И. Пригожин, Г. Хакен) [21, 28].

Общенаучные методы. В работе реализован комплекс стандартных методов теоретического познания: анализ (при изучении эволюции концепций организационной культуры), синтез (при объединении энтропийного и кибернетического подходов), абстрагирование (для построения модели «антиэнтропийного механизма») и сравнение (при сопоставлении элитарной и распределённой моделей управления).

Специальные методы и концептуальный аппарат. Основным инструментом анализа когнитивных ограничений иерархических структур послужил закон необходимого разнообразия У.Р. Эшби ($V_R \geq V_D$). Для количественной интерпретации координационных потерь привлекалась концепция информационной энтропии К. Шеннона, рассматриваемая как метрика неопределённости в процессах интерпретации и принятия решений. Переход

к анализу организации как открытой нелинейной системы выполнен с опорой на теорию диссипативных структур И. Пригожина, позволяющую интерпретировать инновационную культуру как фактор структурирования флуктуаций.

Системно-компаративный подход. Особое место в работе занимает сопоставительный анализ архитектурных типов управления. С помощью метода типологизации выявлены принципиальные различия между элитарной, бюрократической и распределённой парадигмами по таким критериям, как характер управления и способ работы с энтропией (таблица).

Методы моделирования и визуализации. Для иллюстрации теоретических выводов применены методы концептуального и графического моделирования:

- модель фазового перехода (рис. 1) демонстрирует точку превышения когнитивной пропускной способности централизованного ядра;

- фазовый портрет организационной устойчивости (рис. 2) визуализирует закон Эшби применительно к соотношению «разнообразие регулятора – сложность среды».

Эпистемологический каркас. Применение указанного инструментария позволило реализовать главную задачу методологического раздела: перевести рассмотрение инновационной организационной культуры из плоскости ценностно-нормативных феноменов в плоскость системно-кибернетического анализа. Тем самым культура интерпретируется не просто как «мягкий» ресурс мотивации, а, прежде всего, как структурный оператор, обеспечивающий перераспределение когнитивной нагрузки и поддержание связности системы в условиях нарастающей энтропии.

Таким образом, избранный методологический подход, основанный на синтезе кибернетики, теории информации и синергетики, позволяет перейти от описания инновационной культуры как совокупности норм и ценностей (в русле классических работ Э. Шейна [5] и Г. Хофстеде [6]) к её рассмотрению в качестве системного механизма переработки организационной сложности. Это задаёт аналитическую рамку для дальнейшего анализа кризиса централизованного управления, энтропийных эффектов и обоснования перехода к распределённой когнитивной архитектуре. В отличие от традиционных подходов, акцентирующих стимулирование новизны (инноваций), предлагаемая оптика фокусируется на способности организации удерживать когнитивную связность в условиях экспоненциального роста внешней и внутренней сложности.

Результаты исследования и их обсуждение

Смена исследовательского подхода позволяет увидеть пределы классической элитарной модели управления. В индустриальной логике субъект инновационного действия локализовался либо в индивидуальном носителе исключительной компетенции, либо в узком управленческом и экспертном ядре. Такая модель предполагает, что именно центр обладает потенциалом интерпретации среды, селекции значимых сигналов и инициирования решений. Однако в условиях высокой сложности эта архитектура сталкивается с принципиальным ограничением: когнитивная ёмкость централизованного контура конечна, тогда как объём подлежащих переработке различий растёт быстрее, чем центр способен их интерпретировать и согласовывать. В результате возникает разрыв между сложностью среды и возможностями управляющего ядра, который проявляется в росте управленческого шума, задержках координации и утрате смысловой связности. Именно отсюда проистекает необходимость перехода к распределённой когнитивной архитектуре, где часть интерпретации, анализа и принятия решений перераспределяется между различными уровнями организации.

Переход к распределённой когнитивной архитектуре означает такой режим организационного действия, при котором интерпретация среды, генерация решений и производство инноваций перестают быть монополией узкого центра. Когнитивная работа системы начинается осуществляться не только вертикально, но и горизонтально – через сеть взаимосвязанных контуров, обладающих правом локальной интерпретации и инициативы.

В этой конфигурации инновационная организационная культура выполняет ключевую функцию: она легитимирует и поддерживает новые формы координации, без которых распределённое участие не может стать устойчивым режимом, а останется лишь декларацией.

Особое значение в этой трансформации приобретает включение ИИ в контуры организационного действия. ИИ рассматривается здесь не просто как инструмент автоматизации, а как внешний когнитивный модуль, способный частично компенсировать ограничения человеческого канала переработки информации. Это означает, что инновационная культура нового типа должна регулировать не только взаимодействие между людьми, но и взаимодействие между человеческими и интеллектуальными агентами: распределение доверия, ответственности, инициативы и права интерпретации в гибридном контуре принятия решений. Тем самым речь идёт не о технологическом дополнении к прежней модели, а о предпосылке более глубокой трансформации архитектуры организационной когниции, которая будет рассмотрена далее.

1. Энтропийно-кибернетическая интерпретация организационной сложности.

Теоретический кризис элитарных моделей управления требует обращения к энтропийному и кибернетическому языку описания организационной сложности. Важно подчеркнуть, что в настоящей статье математические и физические конструкции используются не как буквальное перенесение естественнонаучных моделей в социальную реальность, а как аналитические инструменты, позволяющие сделать видимыми пределы централизованной координации. В этом смысле инновационная организационная культура рассматривается как антиэнтропийный механизм: не устраняющий неопределённость как таковую, а снижающий её деструктивный эффект за счёт перераспределения когнитивной нагрузки и поддержания организационной связности.

1.1. Информационная энтропия Шеннона и координационные потери.

Коммуникационную дезорганизацию можно описать с помощью формулы информационной энтропии К. Шеннона [20], в которой энтропия выражает степень неопределённости системы: где p_i – вероятность различных состояний системы:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log^2 p_i.$$

В организационном контексте данная формула позволяет интерпретировать управленческую энтропию как меру неопределённости в процессах интерпретации и принятия решений. Чем больше число альтернативных сценариев и чем менее выражено их различие по вероятности, тем выше уровень неопределённости, а значит – тем сложнее системе выделять значимые сигналы и координировать действия. В условиях перегруженной элитарной модели это означает, что рост числа конкурирующих интерпретаций и сигналов приводит не к увеличению точности решений, а к их размыванию: различия перестают эффективно отбираться, и система начинает функционировать в режиме информационного шума.

1.2. Структурная энтропия Больцмана.

Дополнительную эвристическую ценность имеет статистическая аналогия, восходящая к Л. Больцману [29], где энтропия связывается с числом возможных состояний системы. В формализованном виде эта зависимость выражается формулой:

$$S = k_B \cdot \ln W,$$

где S – управленческая энтропия системы; k_B – коэффициент организационной связности (аналог константы Больцмана), определяющий масштаб и интенсивность внутренних взаимодействий; W – число возможных микроконфигураций элементов системы, соответствующих данному уровню её организации.

В применении к организации это позволяет зафиксировать следующий принцип: по мере роста числа акторов, связей и потенциальных конфигураций координации резко возрастает объём различий, подлежащих согласованию.

Если организационная культура не обеспечивает механизмов селекции, фильтрации и распределения когнитивной нагрузки, рост структурной сложности начинает работать как фактор дезорганизации. В отличие от информационной интерпретации энтропии, акцентирующей неопределённость сигналов, подход Больцмана позволяет увидеть проблему на уровне структурной организации системы. Рост числа возможных конфигураций означает не только увеличение сложности, но и экспоненциальное расширение пространства координационных состояний, которые система должна учитывать.

В условиях централизованной архитектуры управления это приводит к перегрузке управляющего ядра, поскольку количество потенциальных взаимодействий начинает превышать возможности их осмысленного согласования. В результате организация сталкивается не просто с ростом неопределённости, а с усложнением самой структуры возможных решений.

В этой логике инновационная организационная культура выступает как механизм, позволяющий не сокращать число состояний, а структурировать их, обеспечивая селекцию значимых конфигураций и перераспределение когнитивной нагрузки между различными уровнями системы.

1.3. Закон необходимого разнообразия Эшби.

Для целей настоящей статьи наиболее продуктивной оказалась кибернетическая логика У.Р. Эшби, согласно которой устойчивость системы возможна лишь при условии, что разнообразие регулятора не меньше разнообразия возмущений среды: $V_R \geq V_D$, где V_R обозначает разнообразие управляющего контура, V_D – разнообразие внешних возмущений и вызовов среды.

В организационном плане это означает, что рост сложности среды не может быть компенсирован простым усилением контроля или бюрократическим упрощением. Если разнообразие внешних вызовов устойчиво превышает разнообразие управляющего контура, организация теряет способность к адекватной переработке сигналов: решения начинают запаздывать, координация усложняется, а управленческое воздействие всё чаще превращается в реакцию на уже случившиеся, а не на формирующиеся изменения.

Именно в этой точке становится виден предел элитарной модели управления. Её проблема состоит не только в концентрации власти или знания, но, прежде всего, в ограниченной способности узкого центра перерабатывать возрастающее разнообразие среды. Когда организация сохраняет централизованную архитектуру в условиях нелинейной сложности, она неизбежно сталкивается с дефицитом регулятивного разнообразия.

Отсюда следует ключевой вывод для настоящей статьи: инновационная организационная культура должна пониматься как механизм расширения разнообразия регулятора. Она выполняет эту функцию не за счёт простого увеличения числа участников, а за счёт перераспределения права на интерпретацию, инициативу и принятие решений между множеством взаимосвязанных контуров организационного действия. Тем самым инновационная культура выступает не внешним сопровождением инноваций, а условием восстановления кибернетической соразмерности между сложностью среды и возможностями организации. Сопоставление рассмотренных подходов позволяет выделить три базовые парадигмы управления в условиях роста организационной энтропии и контроля сложности (таблица).

Таблица 1

Три парадигмы управления в условиях роста организационной энтропии и контроля сложности

Парадигма	Характер управления	Работа с энтропией	Ограничения
Элитарная	Централизованная интерпретация и принятие решений	Попытка подавления неопределённости через контроль и регламенты	Когнитивный предел центра, рост управленческого шума

Парадигма	Характер управления	Работа с энтропией	Ограничения
Бюрократическая	Формализованное распределение процедур	Частичное снижение энтропии за счёт стандартизации	Рост внутреннего трения, снижение адаптивности
Распределённая	Децентрализованная когнитивная архитектура	Перераспределение и структурирование энтропии	Требует развитой инновационной культуры и доверия

Примечание: составлено авторами на основе синтеза энтропийного и кибернетического подходов (К. Шеннон, Л. Больцман, У.Р. Эшби)

Особое место в этой типологии занимает бюрократическая или парадигма институционально упорядоченной координации, которая может рассматриваться как промежуточная (транзитная) модель между элитарной и распределённой архитектурами. В отличие от элитарной модели, институционально упорядоченная/бюрократическая модель уже предполагает формализованное распределение процедур, что создаёт институциональную основу для децентрализации. Однако, в отличие от распределённой, она не наделяет агентов правом локальной интерпретации и инициативы, сохраняя жёсткую регламентацию. Тем самым институционально упорядоченная/бюрократическая модель выполняет функцию «переходного моста»: она позволяет организации частично снизить энтропию за счёт стандартизации, но на определённом этапе сама становится источником внутреннего трения, блокируя дальнейшую адаптацию. Переход к распределённой когнитивной архитектуре требует преодоления ограничений не только элитарной, но и институционально упорядоченной/бюрократической модели, что предполагает развитие инновационной культуры, способной легитимировать горизонтальные формы координации.

Представленная типология показывает, что переход к распределённой когнитивной архитектуре связан не с устранением энтропии, а с изменением способа работы с ней: от её подавления и компенсации к перераспределению и структурированию.

На фазовом портрете организационной устойчивости соотношение V_R и V_D позволяет визуализировать условие кибернетической соразмерности между возможностями регулятора и сложностью среды. Ниже этой границы возникает режим управленческого дефицита: сложность среды превышает возможности координации, а система начинает расходовать ресурсы на внутреннее трение и бюрократическую компенсацию. Выше данной линии формируется антиэнтропийный резерв, при котором избыточное разнообразие регулятора позволяет не только удерживать устойчивость, но и обеспечивать проактивную адаптацию.

В более широкой системной перспективе организация может быть интерпретирована как открытая система, устойчивость которой зависит не от изоляции от внешней сложности, а от способности перерабатывать её без накопления деструктивных перегрузок. В этом смысле обращение к понятию диссипативной структуры И. Пригожина [21] подтверждает тезис, что порядок в сложной системе поддерживается не через полное подавление флуктуаций, а через их структурирование и включение в новые режимы координации. Инновационная организационная культура в такой перспективе выступает механизмом, который помогает переводить часть неопределённости из режима дезорганизации в режим продуктивной переработки.

В этой логике институционально упорядоченная/бюрократическая модель может быть интерпретирована как «закрытая» диссипативная структура, которая пытается гасить флуктуации через стандартизацию, но не способна использовать их для самоорганизации. Распределённая архитектура, напротив, представляет собой «открытую» диссипативную структуру, где инновационная культура выполняет роль оператора, переводящего внешний хаос во внутреннюю сложность и поддерживающего систему в состоянии динамического равновесия. Переход от закрытой к открытой диссипативной структуре невозможен без развития культурных механизмов, легитимирующих эксперимент, локальную инициативу и распределённую когницию.

Применение энтропийного и кибернетического инструментария позволяет более строго интерпретировать механизмы антиэнтропийной работы инновационной организационной культуры, переводя такие категории, как «доверие», «креативность» и «гибкость», в плоскость системных зависимостей.

В этой логике организацию можно рассматривать как открытую систему, преобразующую доступные ресурсы – знания, информацию и человеческий капитал – в управленческое действие и инновационные решения. В рамках данной аналогии рост управленческой энтропии проявляется как увеличение потерь, связанных с координационным шумом и внутренним трением.

Эвристически этот процесс может быть представлен через соотношение:

$$A = Q - T \cdot \Delta S,$$

где A – объём полезной управленческой работы системы (инновации, адаптивные решения); Q отражает совокупный когнитивный ресурс системы; T – уровень внешней турбулентности среды; ΔS – приращение внутренней энтропии, связанное с ростом неопределённости и координационных потерь.

В отличие от элитарной модели, ориентированной на изоляцию управляющего центра от сложности, инновационная организационная культура функционирует как механизм переработки и перенаправления энтропии, позволяя системе сохранять работоспособность за счёт структурирования, а не подавления неопределённости.

В качестве дополнительной эвристической аналогии можно указать на метафоры когерентности и декогеренции, позволяющие описывать степень смысловой связанности организационной системы. В этом смысле рост шума, конфликтов интерпретации и дефицита доверия может рассматриваться как процесс декогеренции, тогда как инновационная культура – как среда поддержания согласованности между различными контурами организационного действия. Однако данная аналогия имеет исключительно интерпретативный, а не строго моделирующий характер.

Рассмотренные положения позволяют перейти от абстрактного описания роста энтропии к его более наглядной динамической интерпретации. В условиях превышения когнитивной пропускной способности централизованного управляющего контура система достигает предельного состояния, за которым дальнейший рост сложности приводит к утрате управляемости. Данный переход может быть представлен как фазовый сдвиг организационной системы, отражающий смену режима её функционирования (рис. 1).

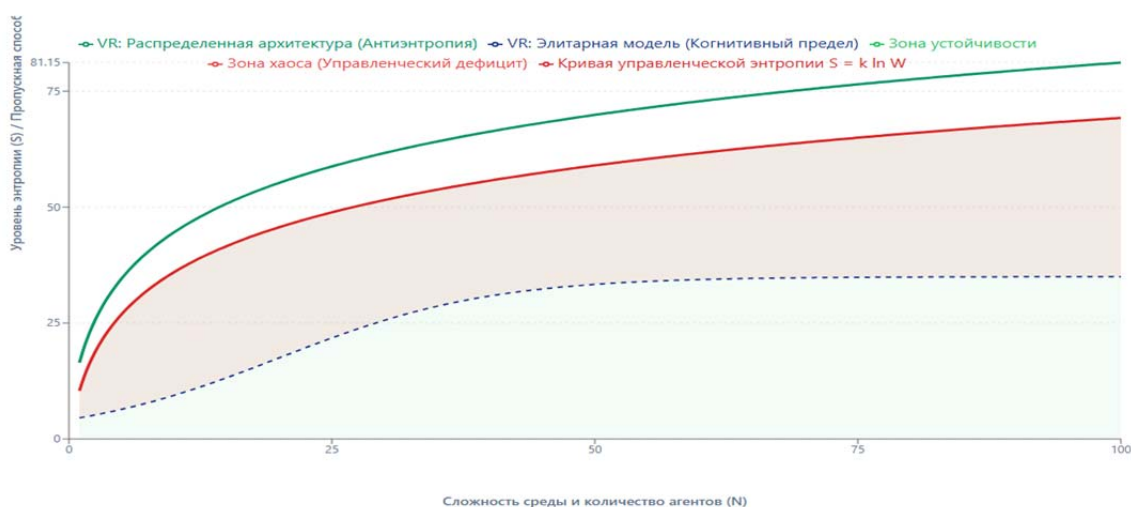


Рис. 1. Модель фазового перехода организационной системы при достижении предела управленческой пропускной способности (разработано авторами)

Здесь показано, что в условиях роста сложности элитарная модель управления имеет жёсткий когнитивный предел, за которым система теряет управляемость. В отличие от неё, распределённая когнитивная архитектура обладает способностью масштабироваться вместе с ростом числа связей и информационных потоков. Точка пересечения кривых соответствует моменту фазового перехода, в котором дальнейшее сохранение централизованной модели становится невозможным без деградации системы.

Представленная динамика может быть дополнительно проинтерпретирована в терминах кибернетической соразмерности между сложностью среды и возможностями управляющего контура. В этом контексте принципиальное значение приобретает закон необходимого разнообразия У.Р. Эшби, позволяющий формализовать условия сохранения организационной устойчивости и уточнить границы применимости централизованных моделей управления (рис. 2).

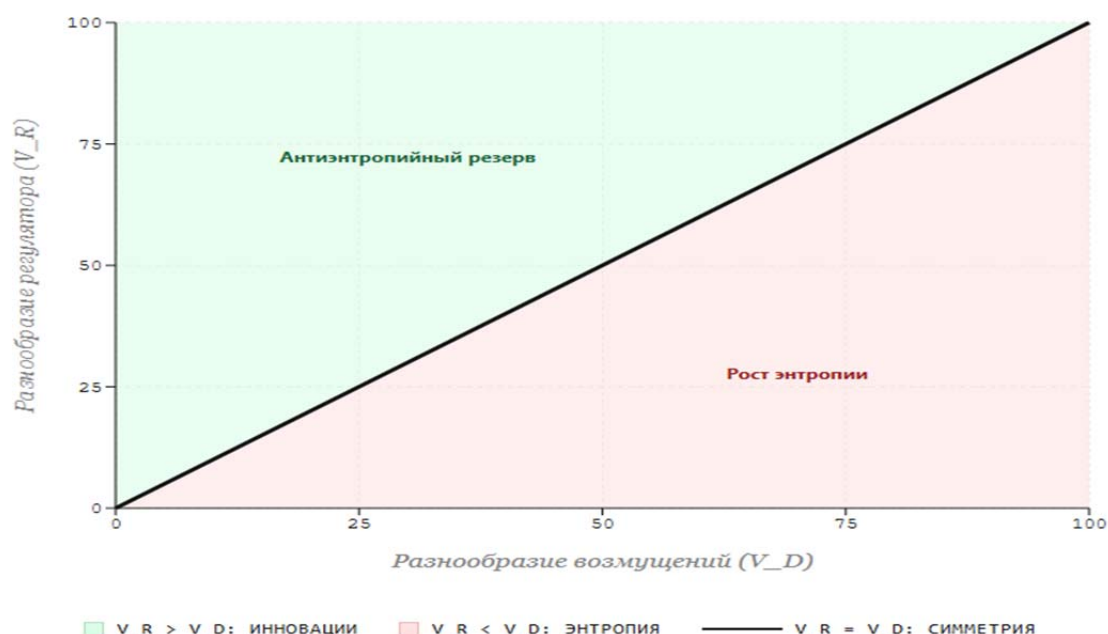


Рис.2. Фазовый портрет организационной устойчивости. Визуализация закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби: соотношение разнообразия регулятора (V_R) и возмущений среды (V_D) (разработано авторами на основе закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби)

Представлена визуализация закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби. Биссектриса $V_R = V_D$ соответствует состоянию кибернетической соразмерности, при котором организация ещё способна компенсировать сложность среды. Область $V_R < V_D$ отражает режим управленческого дефицита, в котором сложность внешних воздействий превышает возможности регулятора, что приводит к росту энтропии, бюрократизации и потере управляемости. Напротив, область $V_R > V_D$ характеризуется наличием антиэнтропийного резерва: избыточное разнообразие управляющего контура позволяет системе не только адаптироваться, но и проактивно трансформироваться.

2. ИИ как дополнительная размерность организационной архитектуры.

В рамках предлагаемого подхода ИИ следует рассматривать не как очередную итерацию автоматизации или прикладной ИТ-инструмент, а как новую системную координату – фундаментальный вектор развития, который ранее отсутствовал в метрике организационного пространства, и это самый радикальный сдвиг за последние десятилетия.

Топологическая метафора перехода. Для описания процесса интеграции ИИ наиболее адекватна топологическая метафора перехода из пространства размерности n в пространство размерности $n+1$. В этой модели классическая организация функционирует в ограниченном наборе управленческих измерений (n), где многие задачи кажутся неразрешимыми из-за

системных ограничений самой плоскости управления. Добавление координаты ИИ ($n+1$) радикально меняет свойства системы. В топологии переход в более высокую размерность позволяет «обходить» барьеры, которые были непреодолимы в низшем измерении. То, что в пространстве n выглядело как неразрешимый конфликт ресурсов или когнитивная перегрузка центра, в пространстве $n+1$ находит решение за счёт нелинейной оптимизации и алгоритмической связности.

Однако математическая аналогия служит и предупреждением: модели управления, выстроенные для работы в n измерениях, становятся фатально неполными в новой реальности. Организация не может просто «внедрить» ИИ, оставаясь в прежней плоской структуре. Она должна совершить топологический скачок, пересобрав свою архитектуру вокруг нового вектора. Такой переход не является линейным усовершенствованием существующих процессов: те ограничения, которые в прежней архитектуре выглядят как неразрешимые – перегрузка центра, задержки координации, конфликт интерпретаций – в новой конфигурации могут быть преодолены за счёт перераспределения когнитивной нагрузки между человеческими и интеллектуальными агентами.

Феномен внутренней симметрии. Возможность такого перехода определяется не только наличием технологий, но и состоянием самой организации. Ключевым условием выступает феномен внутренней симметрии – способность структуры отражать и перерабатывать сложность среды без разрушения собственной когнитивной целостности. В контексте системной архитектуры это означает наличие структурного изоморфизма: способности внутренней конфигурации организации зеркально отражать возрастающую сложность внешней среды.

В прикладном плане внутренняя симметрия проявляется в нескольких характеристиках:

- конфигурационной гибкости организационных связей, позволяющей системе трансформироваться без разрыва базовой логики функционирования;
- способности системы интегрировать технологические импульсы без дезорганизации, преобразуя «взрывные» изменения в системный ресурс;
- согласованности человеческих и алгоритмических контуров принятия решений, обеспечивающей «симметрию» между человеческим целеполаганием и машинным исполнением.

При отсутствии данной симметрии интеграция ИИ не снижает энтропию, а усиливает её, создавая дополнительные уровни координационного шума. Без предварительной настройки внутренних свойств попытка освоить измерение $n+1$ приводит лишь к коллапсу системы, не способной выдержать давление новой мерности.

В этом смысле инновационная организационная культура выступает не просто средой поддержки новшеств, а необходимым условием освоения новой размерности, обеспечивая согласованность и когнитивную связность гибридной системы. Именно культура легитимирует распределение доверия, ответственности и права интерпретации между человеческими и интеллектуальными агентами, создавая ту самую «внутреннюю симметрию», без которой топологический переход невозможен.

Заключение

Проведённое исследование позволяет пересмотреть онтологический статус инновационной организационной культуры в контурах современного управления. Инновационная организационная культура интерпретируется не как второстепенный ценностный фон инновационной активности [5, 6, 8] и не как ресурс стимулирования новизны [7, 13, 14], а как антиэнтропийный механизм, обеспечивающий управляемость сложных систем в условиях экспоненциального роста внешней и внутренней неопределённости. Показательно, что даже в самых свежих эмпирических и практико-ориентированных исследованиях последних лет (2023–2025 гг.) [30–32] организационная культура и лидерство продолжают рассматриваться исключительно в рамках традиционной

парадигмы – как ценностно-поведенческие факторы инновационной активности, не доходя до антиэнтропийной интерпретации. Преодоление этого ограничения требует перехода к антиэнтропийной интерпретации, что и составляет ядро предлагаемого подхода.

Ключевым результатом является смещение фокуса с мотивационной парадигмы на системно-кибернетическую функцию культуры: сдерживание деструктивных эффектов энтропии не через подавление разнообразия, а через его перераспределение и структурирование. Обосновано, что элитарная модель управления исчерпала себя ввиду конечной пропускной способности централизованного когнитивного ядра. В качестве эволюционной альтернативы предложена модель перехода к распределённой когнитивной архитектуре через институционально упорядоченные (бюрократические) формы координации, которые играют роль транзитного «моста», создающего предпосылки для децентрализации, но требующего дальнейшего развития культуры горизонтального взаимодействия.

Отдельное место в трансформации занимает ИИ, концептуализированный не как инструмент автоматизации, а как новая размерность организационного пространства (топологический переход $n \rightarrow n+1$). Показано, что интеграция ИИ позволяет преодолеть когнитивные барьеры, неразрешимые в прежней системе координат, однако её эффективность напрямую зависит от наличия «внутренней симметрии» – способности организации выстраивать когерентность между человеческими и алгоритмическими контурами, что обеспечивается именно инновационной культурой.

Таким образом, инновационная организационная культура – это не просто вспомогательный элемент, а необходимое условие сохранения управляемости и устойчивого развития в эпоху технологической сингулярности. Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой количественных методов диагностики организационной энтропии и проверкой предложенной модели на эмпирических данных гибридных управленческих систем.

Список источников

1. Barros V., Ramos I. Collective attention overload in a global manufacturing company: a case study // *Information Systems and E-Business Management*. 2024. P. 391–422. DOI: 10.1007/s10257-024-00693-z
2. Мусиенко Т.В. Теоретические подходы к исследованию инновационной организационной культуры // *Культура и безопасность*. 2026.
3. Мусиенко Т.В. Управление инновационным развитием организационных систем на основе оценки цифровой зрелости: сравнительный анализ современных концептуальных подходов и моделей // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. 2026. № 1. С. 70–90. DOI: 10.61260/2218-13X-2026-1-70-90
4. Артамонов В.С., Лукин В.Н., Мусиенко Т.В. Корпоративные университеты: приоритеты управления, решения, перспективы. Часть 2 // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. 2024. № 4. С. 53–69. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-53-69
5. Шейн Э.Х. Организационная культура и лидерство. 4-е изд. М.: Питер, 2010. 416 с.
6. Хофстеде Г. Культуры и организации: программное обеспечение разума. М.: Питер, 2007. 576 с.
7. Амабайл Т.М. Креативность в контексте: обновление социальной психологии креативности. М.: Альпина нон-фикшн, 2018. 336 с.
8. Камерон К.С., Куинн Р.Е. Диагностика и изменение организационной культуры. М.: Альпина Паблишер, 2013. 288 с.
9. Silva L.F., Oliveira J.P., Santos R.M. Innovation culture in public organizations // *Journal of Innovation Management*. 2022. Vol. 10. № 2. P. 45–60.
10. Chen Z., Wang Y., Park J. Research on the impact of digital transformational leadership on digital innovation performance: the role of digital strategy // *PMC*. 2026. PMC12876880.
11. Денисон Д.Р. Корпоративная культура и организационная эффективность. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 288 с.

12. Добрник К.Б. Измерение культуры инноваций в организациях: разработка общего конструкта культуры инноваций с использованием факторного анализа // Европейский журнал инновационного менеджмента. 2008. Т. 11. № 4. С. 539–559.
13. Мартинс Э.С., Тербланш Ф. Формирование организационной культуры, стимулирующей креативность и инновации // Европейский журнал инновационного менеджмента. 2003. Т. 6. № 1. С. 64–74.
14. Breaking barriers to innovation: The power of digital transformation / J. Li [et al.] // Finance Research Letters. 2023. Vol. 52. P. 103633. DOI: 10.1016/j.frl.2022.103633
15. Overcoming barriers to digital transformation in universities / Е.А. Войскунский [и др.] // Вестник ВГМУ. 2025. № 2. С. 45–56.
16. The Cultural Barriers to Digital Transformation: Why Businesses Struggle to Embrace Technology // Institute of Internet Economics. 2025. URL: <https://instituteofinterneteconomics.org/the-cultural-barriers-to-digital-transformation-why-businesses-struggle-to-embrace-technology/> (дата обращения: 16.04.2026).
17. Jarrahi M.H. Artificial intelligence and the future of work: human–AI symbiosis // Business Horizons. 2018. Vol. 61. № 4. P. 577–586. DOI: 10.1016/j.bushor.2018.03.007
18. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: Иностранная литература, 1958. 416 с.
19. Amazon's 20-Year Management Philosophy: Anti-Entropy // Business Weekly (Taiwan). 2019. URL: <https://www.businessweekly.com.tw/management/blog/3000297> (дата обращения: 16.04.2026).
20. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423, 623–656.
21. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 287 с.
22. Organizational entropy as a measure of sustainability in organizations / A. Martínez-Bermúdez [et al.] // Sustainability. 2018. Vol. 10. № 11. P. 3916.
23. Hirsh J.B., Mar R.A., Peterson J.B. Psychological entropy: a framework for understanding uncertainty-related anxiety // Psychological Review. 2012. Vol. 119. № 2. P. 304–320.
24. Jia H., Wang L. Introducing entropy into organizational psychology: an entropy-based proactive control model // Behavioral Sciences. 2024. Vol. 14. № 1. P. 54.
25. Hutchins E. Cognition in the Wild. M.: URSS, 2017.
26. Clark A. Natural-Born Cyborgs: Minds, Technologies, and the Future of Human Intelligence. M.: Alpina, 2011.
27. Bertalanffy L. General System Theory: A Critical Review. M.: Progress, 1969.
28. Haken H. Synergetics: Hierarchies of Instabilities in Self-Organizing Systems. M.: Mir, 1985.
29. Boltzmann L. Lectures on Gas Theory. Berkeley: University of California Press, 1964.
30. Leadership's long arm: the positive influence of digital leadership on managing technology-driven change over a strengthened service innovation capacity / A. Curuksu [et al.] // Frontiers in Psychology. 2023. Vol. 14. P. 988808. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.988808
31. Yilmaz A. Digital transformation in organizations: the role of leadership in fostering innovation culture // Bilkent University Repository. 2025.
32. Santos A.C., Oliveira R.F.M., Oliveira A.S. Implementing a culture of innovation in a three-century-old public company // Revista de Administração Contemporânea. 2025. Vol. 29. Iss. 3. DOI: 10.1590/1982-7849rac2021230451.pt

References

1. Barros V., Ramos I. Collective attention overload in a global manufacturing company: a case study // Information Systems and E-Business Management. 2024. P. 391–422. DOI: 10.1007/s10257-024-00693-z
2. Musienko T.V. Teoreticheskie podhody k issledovaniyu innovacionnoj organizacionnoj kul'tury // Kul'tura i bezopasnost'. 2026.

3. Musienko T.V. Upravlenie innovacionnym razvitiem organizacionnyh sistem na osnove ocenki cifrovoj zrelosti: sravnitel'nyj analiz sovremennyh konceptual'nyh podhodov i modelej // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2026. № 1. S. 70–90. DOI: 10.61260/2218-13X-2026-1-70-90
4. Artamonov V.S., Lukin V.N., Musienko T.V. Korporativnye universitety: priority upravleniya, resheniya, perspektivy. Chast' 2 // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2024. № 4. S. 53–69. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-53-69
5. Shejn E.H. Organizacionnaya kul'tura i liderstvo. 4-e izd. M.: Piter, 2010. 416 s.
6. Hofstede G. Kul'tury i organizacii: programmnoe obespechenie razuma. M.: Piter, 2007. 576 s.
7. Amabajl T.M. Kreativnost' v kontekste: obnovlenie social'noj psihologii kreativnosti. M.: Al'pina non-fikshn, 2018. 336 s.
8. Kameron K.S., Kuinn R.E. Diagnostika i izmenenie organizacionnoj kul'tury. M.: Al'pina Publisher, 2013. 288 s.
9. Silva L.F., Oliveira J.P., Santos R.M. Innovation culture in public organizations // Journal of Innovation Management. 2022. Vol. 10. № 2. P. 45–60.
10. Chen Z., Wang Y., Park J. Research on the impact of digital transformational leadership on digital innovation performance: the role of digital strategy // PMC. 2026. PMC12876880.
11. Denison D.R. Korporativnaya kul'tura i organizacionnaya effektivnost'. M.: Al'pina Biznes Buks, 2007. 288 s.
12. Dobrnik K.B. Izmerenie kul'tury innovacij v organizacijah: razrabotka obshchego konstrukta kul'tury innovacij s ispol'zovaniem faktornogo analiza // Evropejskij zhurnal innovacionnogo menedzhmenta. 2008. T. 11. № 4. S. 539–559.
13. Martins E.S., Terblansh F. Formirovanie organizacionnoj kul'tury, stimuliruyushchej kreativnost' i innovacii // Evropejskij zhurnal innovacionnogo menedzhmenta. 2003. T. 6. № 1. S. 64–74.
14. Breaking barriers to innovation: The power of digital transformation / J. Li [et al.] // Finance Research Letters. 2023. Vol. 52. P. 103633. DOI: 10.1016/j.frl.2022.103633
15. Overcoming barriers to digital transformation in universities / E.A. Vojskunskij [i dr.] // Vestnik VGMU. 2025. № 2. S. 45–56.
16. The Cultural Barriers to Digital Transformation: Why Businesses Struggle to Embrace Technology // Institute of Internet Economics. 2025. URL: <https://instituteofinterneteconomics.org/the-cultural-barriers-to-digital-transformation-why-businesses-struggle-to-embrace-technology/> (data obrashcheniya: 16.04.2026).
17. Jarrahi M.H. Artificial intelligence and the future of work: human–AI symbiosis // Business Horizons. 2018. Vol. 61. № 4. P. 577–586. DOI: 10.1016/j.bushor.2018.03.007
18. Eshbi U.R. Vvedenie v kibernetiku. M.: Inostrannaya literatura, 1958. 416 s.
19. Amazon's 20-Year Management Philosophy: Anti-Entropy // Business Weekly (Taiwan). 2019. URL: <https://www.businessweekly.com.tw/management/blog/3000297> (data obrashcheniya: 16.04.2026).
20. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423, 623–656.
21. Prigozhin I., Stengers I. Poryadok iz haosa: novyj dialog cheloveka s prirodoy. M.: Progress, 1986. 287 s.
22. Organizational entropy as a measure of sustainability in organizations / A. Martínez-Bermúdez [et al.] // Sustainability. 2018. Vol. 10. № 11. P. 3916.
23. Hirsh J.B., Mar R.A., Peterson J.B. Psychological entropy: a framework for understanding uncertainty-related anxiety // Psychological Review. 2012. Vol. 119. № 2. P. 304–320.
24. Jia H., Wang L. Introducing entropy into organizational psychology: an entropy-based proactive control model // Behavioral Sciences. 2024. Vol. 14. № 1. P. 54.

25. Hutchins E. Cognition in the Wild. M.: URSS, 2017.
26. Clark A. Natural-Born Cyborgs: Minds, Technologies, and the Future of Human Intelligence. M.: Alpina, 2011.
27. Bertalanffy L. General System Theory: A Critical Review. M.: Progress, 1969.
28. Haken H. Synergetics: Hierarchies of Instabilities in Self-Organizing Systems. M.: Mir, 1985.
29. Boltzmann L. Lectures on Gas Theory. Berkeley: University of California Press, 1964.
30. Leadership's long arm: the positive influence of digital leadership on managing technology-driven change over a strengthened service innovation capacity / A. Curuksu [et al.] // Frontiers in Psychology. 2023. Vol. 14. P. 988808. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.988808
31. Yilmaz A. Digital transformation in organizations: the role of leadership in fostering innovation culture // Bilkent University Repository. 2025.
32. Santos A.C., Oliveira R.F.M., Oliveira A.S. Implementing a culture of innovation in a three-century-old public company // Revista de Administração Contemporânea. 2025. Vol. 29. Iss. 3. DOI: 10.1590/1982-7849rac2021230451.pt

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.03.2026; одобрена после рецензирования: 24.04.2026; принята к публикации: 27.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 23.03.2026; approved after review: 24.04.2026; accepted for publication: 27.04.2026

Информация об авторах:

Ройзен Александр Моисеевич, генеральный директор Ассоциации радио-электрофизиков (410004, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 37/2), кандидат физико-математических наук, e-mail: aroyzen@mail.ru
Мусиенко Тамара Викторовна, профессор кафедры управления и экономики Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, ассоциированный научный сотрудник Федерального научно-исследовательского социологического центра Российской академии наук Социологического института РАН, действительный член Петровской академии наук и искусств (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор политических наук, кандидат исторических наук, доцент, e-mail: tvm77777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9658-1169>, SPIN-код: 2319-0146

Information about authors:

Roizen Alexander M., general director of Association of radio-electrophysicists, (410004, Saratov, Astrakhanskaya str., 37/2), candidate of physico-mathematical sciences, e-mail: aroyzen@mail.ru
Musienko Tamara V., professor of the department of management and economics of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, associate researcher of the Federal research sociological center of the Russian academy of sciences of the Sociological institute of the Russian academy of sciences, full member of the Petrovsky academy of sciences and arts (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of political sciences, candidate of historical sciences, associate professor, e-mail: tvm77777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9658-1169>, SPIN: 2319-0146

Аналитическая статья

УДК 004.056+004.8+339.543; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-65-81

**АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО И ОБЪЯСНИМОГО
АНАЛИЗА РИСКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОСЛЕ ВЫПУСКА ТОВАРОВ**

✉ Грызунов Виталий Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Лемихов Иван Владимирович.

Главное управление МЧС России по Камчатскому краю,

г. Петропавловск-Камчатский, Россия

✉ viv1313r@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена критической необходимостью перехода таможенного администрирования Российской Федерации от автоматизации отдельных операций к интеллектуальным контурам поддержки принятия решений в соответствии со Стратегией развития до 2030 г. При этом сохраняется высокая цена ошибки должностного лица, растут требования к обоснованности проверок и адресности контроля. Возникает противоречие между необходимостью интеллектуализации постконтроля на основе искусственного интеллекта и высокой ответственностью инспекторов, ограниченностью времени, ростом слабых сигналов риска и недоверием к непрозрачным моделям типа «чёрного ящика». Цель работы – разработка архитектуры системы интеллектуального и объяснимого анализа рисков для контроля после выпуска товаров, ориентированной на безопасную апробацию в формате низкорискового пилота. Метод исследования базируется на проектировании четырёхконтурной микросервисной архитектуры, интегрирующей извлечение открытых сигналов, детерминированную интерпретацию искусственного интеллекта, оркестрацию действий по ситуации и интеллектуальный интерфейс к документам, а также на экономико-математическом моделировании нелинейного риск-скоринга и минимизации функции ожидаемых операционных потерь. В статье впервые обоснована концепция встроенной объяснимости, при которой контекстная компонента данных (источник, доверие, статус) обрабатывается синхронно с числовыми признаками, обеспечивая 100 % воспроизводимый трассировочный след решения. Представлена адаптивная система маршрутизации на основе атрибутированного мультиграфа, переводящая аналитический вывод в параметризованные сценарии реагирования, и когнитивная мультиагентная архитектура, симулирующая работу опытного инспектора с механизмом мета-когнитивной верификации. Показана эффективность трёхклассовой логики принятия решений, при которой промежуточный класс аналитической неопределённости обрабатывается автоматически, что снижает долю необоснованных глубоких проверок. Практическая значимость заключается в предоставлении концептуальной модели для бесшовной интеграции в действующие системы Федеральной таможенной службы Российской Федерации через защищённые API, а также в регламентации безопасного пилотирования в закрытом контуре на базе квантизованных Small Language Models. Экспериментальная апробация на синтетическом датасете подтвердила внутреннюю логическую связность архитектуры, работоспособность сквозной маршрутизации и математическую гарантию аддитивности объяснений детерминированной интерпретации искусственного интеллекта. Предложенный подход позволяет трансформировать стандартный риск-скоринг в процессуально обоснованный полуавтоматический контроль, обеспечивая юридическую значимость выводов искусственного интеллекта. Помимо таможенного администрирования, архитектура может применяться для построения доверенных систем поддержки принятия решений в других регуляторных органах, требующих верифицируемой аналитики и безопасной работы с данными.

Ключевые слова: объяснимый искусственный интеллект, постконтроль, управление рисками на основе данных, оркестрация действий, мультиагентная архитектура

Для цитирования: Грызунов В.В., Лемихов И.В. Архитектура интеллектуального и объяснимого анализа рисков для контроля после выпуска товаров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 65–81. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-65-81

Analytical article

ARCHITECTURE OF INTELLIGENT AND EXPLAINABLE RISK ANALYSIS FOR POST-RELEASE CUSTOMS CONTROL

✉Gryzunov Vitaly V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Lemikhov Ivan V.

Main Directorate of the Kamchatka Territory of EMERCOM of Russia,

Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

✉viv1313r@mail.ru

Abstract. The relevance of the study is driven by the critical need for Russian customs administration to transition from automating individual operations to intelligent decision-support frameworks, in accordance with the Development Strategy until 2030. At the same time, the high cost of official errors persists, while requirements for the justification of inspections and targeted control continue to grow. A contradiction arises between the need to intellectualize post-release control based on artificial intelligence, on the one hand, and the high responsibility of inspectors, time constraints, the growing number of weak risk signals, and mistrust of opaque «black box» models, on the other. The aim of this work is to develop an architecture for an intelligent and explainable risk analysis system for post-release customs control, designed for safe pilot testing in a low-risk environment. The research method is based on designing a four-loop microservice architecture that integrates open-source intelligence extraction, deterministic artificial intelligence interpretation, context-aware action orchestration, and an intelligent document interface, as well as on economic-mathematical modeling of nonlinear risk scoring and minimization of the expected operational loss function. The paper introduces, for the first time, the concept of built-in explainability, in which contextual data components (source, confidence, status) are processed synchronously with numerical features, ensuring a 100 % reproducible traceable decision trail. An adaptive routing system based on an attributed multigraph is presented, which translates analytical output into parameterized response scenarios, along with a cognitive multi-agent architecture that simulates the work of an experienced inspector with a metacognitive verification mechanism. The effectiveness of a three-class decision-making logic is demonstrated, whereby an intermediate class of analytical uncertainty is processed automatically, reducing the proportion of unjustified in-depth inspections. The practical significance lies in providing a conceptual model for seamless integration into existing Federal Customs Service of Russia systems via secure APIs, as well as in regulating safe piloting within a closed loop based on quantized small language models. Experimental validation on a synthetic dataset confirmed the internal logical coherence of the architecture, the operability of end-to-end routing, and the mathematical guarantee of additivity of deterministic artificial intelligence interpretation explanations. The proposed approach makes it possible to transform standard risk scoring into procedurally justified semi-automatic control, ensuring the legal significance of artificial intelligence outputs. Beyond customs administration, the architecture can be applied to build trusted decision-support systems in other regulatory bodies requiring verifiable analytics and secure data handling.

Keywords: explainable artificial intelligence, post-release control, data-driven risk management, action orchestration, multi-agent architecture

For citation: Gryzunov V.V., Lemikhov I.V. Architecture of intelligent and explainable risk analysis for post-release customs control // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 65–81. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-65-81

Введение

Цифровая трансформация таможенного администрирования в Российской Федерации смещает акцент с автоматизации отдельных операций к построению интеллектуальных контуров поддержки принятия решений¹. В Стратегии развития таможенной службы Российской Федерации до 2030 года прямо закреплены использование искусственного интеллекта (ИИ) и обработки больших объёмов данных, развитие автоматизированных технологий выбора объектов контроля после выпуска товаров, а также достижение качественно нового уровня такого контроля на основе риск-ориентированного подхода. Одновременно Федеральная таможенная служба Российской Федерации (ФТС России) публично указывает на необходимость максимально автоматизировать выбор объектов контроля так, чтобы это обеспечивало обоснованность проверочных мероприятий.

В этих условиях возрастает не только технологическая, но и организационно-правовая нагрузка на должностное лицо таможенного органа. С одной стороны, от него требуется работа в логике цифровизации, аналитической обработки данных и адресного контроля. С другой стороны, сохраняется высокая цена ошибки, поскольку неправомерные решения, действия или бездействие должностных лиц влекут дисциплинарную, административную, уголовную и иную ответственность, а в дисциплинарном контуре возможны взыскания вплоть до увольнения².

Проблемный аспект исследования состоит в противоречии между, с одной стороны, растущими требованиями государства к интеллектуализации таможенного контроля, его автоматизации, снижению административной нагрузки на добросовестный бизнес и повышению результативности обязательных требований, а с другой – высокой ценой ошибки должностного лица, ограниченностью времени на анализ ситуации, ростом числа слабых сигналов риска и недоверием к непрозрачным моделям типа «чёрного ящика». В этих условиях одной лишь предиктивной модели недостаточно: необходима архитектура, которая сочетает выявление сигналов риска, объяснимость вывода, особенно сделанного ИИ, маршрутизацию действий и безопасную работу с документами и знаниями.

Цель исследования – разработать архитектуру интеллектуального и объяснимого анализа рисков для контроля после выпуска товаров, ориентированную на безопасную апробацию в формате пилота на базе таможенного органа или профильного вуза.

Общая задача исследования заключается в формировании концептуальной и прикладной модели контура аналитики рисков, сочетающего внешний слой открытых сигналов, объяснимый ИИ, адаптивную обработку ситуаций и защищённый интерфейс к документам и знаниям.

Частные задачи исследования состоят в следующем:

1. Критически проанализировать современные подходы к управлению рисками на основе данных (data-driven customs risk management), постконтролю и объяснимому ИИ (explainable AI, XAI).

2. Предложить функциональную архитектуру интеграции внешних сигналов риска, верифицируемой аналитики, оркестрации действий и RAG-интерфейса.

3. Описать математическую модель нелинейного риск-скоринга и логики обработки ситуации.

¹ Стратегия развития таможенной службы Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 23 мая 2020 г. № 1388-р. Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

² Ст. 352. Ответственность таможенных органов и их должностных лиц. Таможенный кодекс Евразийского экономического союза. Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

4. Оценить согласованность предложенной архитектуры с официальными стратегическими ориентирами ФТС России и доступной статистикой постконтроля;
5. Сформулировать параметры и ожидаемые метрики безопасного пилота.

Обзор литературы

В современной научной и прикладной литературе по таможенному администрированию прослеживается устойчивый сдвиг от классического профилирования риска к data-driven и ИИ-ориентированным моделям. В работе [1] показано, что технологически ориентированное и контролируемое данными управление таможенными рисками усиливает безопасность цепей поставок за счёт интеграции аналитики, ИИ и цифровых источников данных на всех этапах движения товара, включая стадию контроля после выпуска. При этом автор акцентирует внимание не только на предсказательной функции, но и на необходимости архитектурной связности решений в таможенном контуре.

Для непосредственно постконтроля показательна ситуация китайской таможни, исследованная в работе [2]. Автор рассматривает применение RPA + AI для анализа рискованных данных в аудите после выпуска и показывает, что результативность достигается не отдельным алгоритмом, а платформенной организацией слоёв инфраструктуры, данных, сервисов, аналитики и визуализации. Особенно важным для настоящего исследования является тезис о том, что информационная безопасность должна быть встроена в саму архитектуру аналитического робота как характеристика операционной среды, а не рассматриваться постфактум.

В российской профильной литературе также нарастает внимание к цифровизации постконтроля. В публикациях Российской таможенной академии [3, 4] подчёркивается, что применение элементов ИИ в автоматизации таможенных операций и в цифровизации контроля после выпуска товаров становится не факультативным, а стратегически необходимым направлением. Вместе с тем даже в этих работах основной акцент делается либо на автоматизацию контроля достоверности сведений, либо на общее направление цифровизации постконтроля, тогда как проблема объяснимости аналитического вывода и его интеграции с последующими действиями сотрудника остаётся раскрытой лишь частично.

Отдельный пласт исследований связан с ХАИ в системах поддержки принятия решений. Обзор [5] показывает, что ХАИ в системах поддержки принятия решений рассматривается как средство не только повышения прозрачности, но и доверия пользователей, операционной пригодности решений и соответствия требованиям подотчётности. Авторы подчёркивают, что в высокозначимых доменах объяснение должно быть связано с контекстом принятия решения, а не ограничиваться постфактум визуализацией важности признаков.

Авторы работы отмечают, что в критических системах поддержки принятия решений ХАИ повышает безопасность только тогда, когда встроен в трёхслойную модель: качество модели, понятность вывода и управляемость реакции. Иными словами, объяснимость сама по себе не даёт эффекта, если она не связана с процедурой действий после прогноза. Этот вывод непосредственно релевантен таможенному постконтролю, где риск-скоринг без обработки ситуации практически не снижает организационную неопределённость.

В международном таможенном контексте дополнительное значение приобретает использование открытых данных. Отчёт Всемирной таможенной организации (WCO)³ по применению разведки по открытым источникам (OSINT) для усиления таможенного контроля показывает, что открытые источники уже рассматриваются как источник

³ STUDY REPORT Unlocking the Value of Open-Source Intelligence for Customs Enforcement JULY 2024. URL: https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/enforcement-and-compliance/activities-and-programmes/security-programme/osint-report_final.pdf (дата обращения: 14.04.2026)

дополнительных индикаторов риска в системе управления риском (СУР), однако относительно немногие таможи внедряют их системно. Это указывает на противоречие: с одной стороны, направление признано перспективным, с другой – отсутствуют устоявшиеся архитектурные модели его безопасной и объяснимой интеграции в контроль после выпуска.

Отчёт WCO по внедрению AI/ML в таможенную⁴ подчёркивает, что для практической апробации ИИ необходимы пилотирование, межфункциональные команды, оценка рисков и происхождения данных, правовое и этическое обоснование и повышение квалификации персонала, что подчёркивает актуальность настоящего исследования, поскольку оно ориентировано не на абстрактную модель, а на пилотное внедрение в закрытом и низкорисковом контуре.

Таким образом, анализ литературы показывает следующее. Во-первых, достаточно хорошо изучены управление риском на основе данных и ИИ-подходы в таможене. Во-вторых, отдельно развиваются исследования по XAI в системах поддержки принятия решений. В-третьих, появляется прикладной интерес к OSINT в ходе усиления таможенного контроля. Однако в литературе практически отсутствует целостная модель, которая одновременно:

1. Использует открытые сигналы риска.
2. Обеспечивает проверяемость и объяснимость вывода.
3. Переводит аналитический вывод в адаптивный сценарий действий по ситуации постконтроля.
4. Содержит безопасный интерфейс к документам и знаниям в изолированном контуре.

На восполнение именно этого пробела и направлено настоящее исследование. Научная новизна состоит в разработке интегральной архитектуры объяснимой аналитики рисков на примере контроля после выпуска.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили системный, структурно-функциональный, сравнительно-правовой, экономико-математический и проектно-архитектурный подходы.

В качестве общих методов познания использованы анализ, синтез, абстрагирование, классификация, сравнение и моделирование. В качестве частных методов применены:

- контент-анализ стратегических и нормативно-организационных документов ФТС России и Правительства Российской Федерации;
- сравнительный анализ международных практик WCO и научных публикаций по «умной» таможене, контролю после выпуска и XAI;
- архитектурное моделирование контуров анализа рисков;
- математическое описание нелинейного интегрального риск-скоринга и логики обработки ситуации;
- анализ синтетического датасета демонстрационного прототипа.

Эмпирическую базу исследования составили:

- Стратегия развития таможенной службы Российской Федерации до 2030 г. и официальный план её реализации;
- официальные сведения ФТС России о результатах контроля после выпуска товаров за 2024 и 2025 г.;
- официальные материалы ФТС России по цифровизации, автоматизации выбора объектов постконтроля и применению ИИ;

⁴ Detailed Report on The Adoption of Artificial Intelligence and Machine Learning in Customs March 2025. URL: https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/facilitation/activities-and-programmes/smart-customs/public-version_detailed-report-on-the-adoption-of-ai-and-ml-in-customs.pdf?la=en (дата обращения: 14.04.2026)

- отчёты WCO по OSINT и AI/ML в таможене;
- авторский демонстрационный прототип, построенный на синтетическом датасете из 20 000 ситуаций контроля после выпуска с 47 входными признаками и трёхклассовой целевой переменной.

Акцент в прототипе сделан на постконтроле, поскольку контроль после выпуска товаров является одним из наиболее результативных направлений контрольной деятельности. По данным ФТС России, за 2024 г. по результатам контроля после выпуска товаров были выявлены нарушения на сумму 56,4 млрд руб.⁵, а за 2025 г. – на сумму 49,3 млрд руб.⁶ Эти данные подтверждают и сохраняющуюся значимость постконтроля, и необходимость повышения адресности отбора объектов проверки, поскольку дальнейшее наращивание эффективности невозможно без более качественной риск-аналитики.

Синтетический датасет сгенерирован путём комбинации статистических распределений маргинальных признаков, заданных корреляционных матриц и сценарийной инъекции рискованных паттернов (аффилированность, логистические аномалии, документарные разрывы) с добавлением гауссова шума. Генерация не имела целью воспроизвести реальные риски в потоке ФТС России, синтетический датасет использовался как среда для стресс-тестирования архитектуры, валидации сквозной маршрутизации и демонстрации работы предлагаемой технологии объяснимости VERIDIC.

Архитектурная постановка задачи

Предлагаемая архитектура включает четыре взаимосвязанных контура, проектируемых как микросервисная надстройка (REST/gRPC API) к действующим информационным системам ФТС России (автоматизированные системы управления рисками (АСУ СУР), комплекс программных средств (КПС) «Постконтроль», АИСТ-М), без создания отдельного графического интерфейса.

1. Контур внешних сигналов риска (OSINT). Предназначен для извлечения дополнительных индикаторов из открытых источников: цифрового профиля участника внешнеэкономической деятельности (ВЭД), структуры контрагентов, косвенных признаков аффилированности, логистических аномалий.

В рамках предлагаемой архитектуры процесс OSINT-разведки формализован не как простой парсинг, а как работа абстрактной вычислительной машины на итеративно расширяемом графе знаний $G = (V, E)$ [6].

Задача контура сводится к поиску скрытых (недекларируемых) свойств участника ВЭД, например, теневой аффилированности или реальной логистики X^{conf} на основе известных публичных атрибутов X^{pub} (регистрационные данные, открытые профили контрагентов, логистические треки). Контур использует набор аналитических предикатов (инструментов поиска), порождающих новые ребра графа – семантические связи между публичными фактами.

Важнейшим механизмом работы контура является *триангуляция* – поиск нескольких независимых (непересекающихся) путей в графе G , сходящихся к одному скрытому свойству X^{conf} . Вывод о наличии риска, например, связи импортера с фирмой-однодневкой, считается достоверным только при условии сходимости доказательств из независимых источников.

⁵ Итоги деятельности таможенных органов по осуществлению таможенного контроля после выпуска товаров за IV квартал 2024 г. URL: <https://customs.gov.ru/activity/results/itogi-deyatel-nosti-tamozhennykh-organov-po-osushhestvleniyu-tamozhennogo-kontrolya-posle-vypuska-tovarov/document/618280> (дата обращения: 15.04.2026)

⁶ Итоги деятельности таможенных органов по осуществлению таможенного контроля после выпуска товаров за 2025 г. URL: <https://customs.gov.ru/activity/results/itogi-deyatel-nosti-tamozhennykh-organov-po-osushhestvleniyu-tamozhennogo-kontrolya-posle-vypuska-tovarov/document/676258> (дата обращения: 15.04.2026).

Для ограничения потребления вычислительных ресурсов и предотвращения бесконечного поиска в архитектуру контура встроена строгая логическая функция останова (F_{stop}).

Процесс сбора открытых данных рассматривается как управляемая процедура фоновой аналитики, завершаемость которой определяется системой предельных условий. Завершение процедуры фиксируется при наступлении одного из следующих состояний: Goal Reached – достижение заданного порога уверенности $A_{threshold}$ за счёт комбинирования независимых публичных индикаторов; Lead Exhaustion – исчерпание множества доступных зацепов, при котором расширение графа публичных свойств не приводит к появлению новых информативных признаков; Resource Depletion – исчерпание выделенного ресурса аналитики, выраженное в превышении временного лимита T_{limit} либо допустимого числа API-запросов, отведённых на обработку одной декларации.

Выявленные в контуре OSINT графовые связи не рассматриваются как самостоятельное юридическое основание для начисления таможенных платежей либо назначения мер процессуального характера. Их функция сводится к формированию дополнительного слоя признаков, статистически и логически значимых для последующего скоринга. Следовательно, указанные связи выступают не доказательственным, а триггерным элементом: они обеспечивают передачу обогащённого вектора признаков в контур VERIDIC, после чего становятся основанием для инициации запроса документов в порядке ст. 326 Таможенного кодекса Евразийского экономического союза (ТК ЕАЭС) либо для аналитической подготовки решения, предшествующей назначению таможенной проверки по ст. 331 ТК ЕАЭС.

Функционирование контура реализуется в режиме одностороннего парсинга открытых источников. При этом выполняется фильтрация персональных данных, а также ограничение на обработку сведений, не относящихся к допустимому множеству открытых признаков. Такое построение контура обеспечивает отделение внешнего аналитического слоя от чувствительных внутренних данных и, тем самым, создаёт условия для его использования в закрытой архитектуре таможенного анализа.

2. *Контур объяснимого и верифицируемого анализа VERIDIC* предназначен для совместного вычисления риск-балла и интерпретации полученного результата. В отличие от аппроксимационных методов объяснимого ИИ, таких как SHAP и LIME, функционирующих как внешняя надстройка над уже сформированным прогнозом, VERIDIC реализует внутреннюю двухконтурную схему вычислений. В рамках данной схемы каждое основное числовое значение v , соответствующее признаку декларации, агрегированному показателю либо промежуточному параметру модели, обрабатывается синхронно с контекстной компонентой γ , логически связанной с данным значением.

Под контекстной компонентой γ понимается структурированный метапризнак, инкапсулирующий происхождение значения, уровень доверия к источнику, признак валидности и статус безопасности. Тогда выполнение любой вычислительной операции в модели, в том числе прохождение по ансамблю деревьев решений или по слоям иной нелинейной структуры, представляется как преобразование пары $(v_{in}, \gamma_{in}) \rightarrow (v_{res}, \gamma_{res})$. Из этого следует, что объяснимость не добавляется к результату постфактум, а формируется непосредственно в процессе вычисления.

В результате основной контур формирует итоговый риск-балл v_{res} , характеризующий вероятность нарушения, контекстный контур формирует структуру γ_{res} , которая содержит точный, детерминированный и 100 % воспроизводимый трассировочный след: какие именно данные, из каких источников и с каким процессуальным статусом привели к данному баллу.

Дополнительно в контур интегрирован многоуровневый протокол защиты Tiered Protection Protocol (ТПР). В базовом режиме (Уровень 0) система обрабатывает тривиальные декларации с максимальной производительностью. При обнаружении аномалий, например, подозрительных инъекций в метаданные документов или попытках численных атак на модель типа Numerical DoS, система динамически повышает уровень ТПР, включая углубленный аудит и отслеживание помеченных данных (taint tracking).

Для должностного лица таможенного органа архитектура VERIDIC решает главную проблему применения ИИ: она обеспечивает юридическую значимость вывода. Инспектор получает не абстрактное «влияние признака», а строгий аудит вычислительной траектории, гарантирующий, что рассчитанный риск опирается на целостные и допустимые данные. То есть, если ИИ говорит: «Цена занижена», инспектор спросит: «Откуда ты взял базовую цену? Из контракта (высокое доверие) или нашел на китайском сайте через OSINT (низкое доверие)?». Архитектура VERIDIC благодаря компоненте γ автоматически выведет на экран инспектора уровень доверия и источник данных, что позволит легко сформировать рапорт на проверку.

3. Контур оркестрации действий по ситуации (ONYX). Переводит аналитический вывод в сценарий реагирования: автоматическая генерация запроса пояснений, фоновый мониторинг, аналитическая оценка инспектором или эскалация на назначение проверки. Задача контура – преодолеть разрыв между выявлением риска и операционным действием, минимизируя ручной разбор пограничных ситуаций.

Данный контур базируется на архитектурной модели X-адаптивного управления (Organizational-technical Networked Yield X-adaptive system). В рамках ONYX таможенный постконтроль рассматривается как единое вычисляемое пространство состояний, формализованное в виде атрибутированного мультиграфа S , где вершинами (V) выступают элементы разной природы (участники ВЭД, должностные лица, документы, контуры VERIDIC и AIVANT), а рёбрами (E) – связи между ними, например, «администрирует», «ожидает пояснений».

В нормальном режиме работы, когда риски приемлемы, система находится во множестве штатных состояний $S_{intended}$. Обнаружение сигнала риска контуром VERIDIC (переход риск-балла в классы $Y_i = 1$ или $Y_i = 2$) математически трактуется как переход графа ситуации в инцидентное состояние $S_{incident}$.

Обнаружение значимого сигнала риска в контуре VERIDIC, сопровождающееся переходом риск-балла в классы $Y_i = 1$ или $Y_i = 2$, трактуется как перевод графа ситуации в инцидентное состояние $S_{incident}$. Возврат к целевому режиму функционирования обеспечивается оператором управления R , который применяет к текущему состоянию параметризованные шаблоны восстановления из множества P .

Каждый шаблон задаётся парой (предусловие; постусловие), где предусловие определяет конфигурацию состояния, при которой шаблон является допустимым, а трансформация описывает детерминированное изменение графа. Постусловие является критерием успешного применения шаблона восстановления. Для случая среднего риска, соответствующего $Y_i = 1$, механизм обработки реализуется как кросс-уровневая компенсация в логике ONYX. Если риск-балл требует аналитической отработки, но текущая пропускная способность узлов типа «Сотрудник» (уровень персонала модели ONYX) оказывается ниже требуемой вследствие высокой загрузки инспектора, то направление ситуации в очередь ручного анализа не выполняется.

Вместо этого оператор R осуществляет перенастройку маршрута обработки: к графу добавляется связь с программным узлом (уровень программного обеспечения), то есть результат детерминированной интерпретации VERIDIC передаётся в контур AIVANT для формирования проекта запроса документов и фоновой аналитической подготовки. Следовательно, достигается реакция на сигнал риска без превышения допустимой когнитивной нагрузки на должностное лицо и без разрушения общей производительности системы.

Использование мультиграфовой модели ONYX обеспечивает выполнение инварианта безопасности. Под данным инвариантом понимается невозможность формирования управляющего воздействия, если не выполнены предикаты валидности соответствующего состояния. В частности, назначение проверки не допускается в ситуации, когда в графе отсутствует связка с подтверждёнными индикаторами риска либо нарушена допустимая конфигурация источников аналитического вывода.

Таким образом, маршрутизация реакции осуществляется не произвольно, а в пределах формально определённого множества допустимых состояний. Это исключает хаотичную генерацию требований к бизнесу и минимизирует ручной разбор пограничных ситуаций.

Элементы ONYX успешно апробированы при создании киберполигона МЧС России как системы, адаптирующей к разноплановой нагрузке в ходе целенаправленных разрушающих воздействий злоумышленников [7].

4. Контур интеллектуального интерфейса к документам и знаниям (AIVANT). В отличие от стандартных систем информационного поиска (RAG), которые способны транслировать только эксплицитное знание (цитирование нормативных актов), AIVANT представляет собой мультиагентную когнитивную архитектуру, предназначенную для извлечения и применения имплицитных (неформализованных) стратегий таможенного контроля [8].

Основываясь на дуальной теории когнитивных процессов (Канеман), архитектура AIVANT симулирует работу опытного инспектора через взаимодействие двух агентов:

1. Агент-интуит (System 1): опирается на граф когнитивных операторов, обученный на паттернах принятия решений опытными должностными лицами (тактика выбора документов для запроса, распознавание логистических аномалий, стратегии сужения зоны неопределенности). Агент осуществляет быстрое распознавание паттернов в данных, поступающих от контуров OSINT и VERIDIC, и генерирует гипотезу проверки.

2. Агент-критик (System 2): осуществляет медленную фактологическую кросс-валидацию гипотезы. При обработке ситуации агент AIVANT реализует гибридный ретривал, сочетающий векторный поиск по телу документов и онтологическую навигацию по графу базы знаний ФТС России. Такое комбинирование позволяет не ограничиваться семантической близостью текстовых фрагментов, а проверять гипотезу на соответствие нормативным и процедурным ограничениям, включая положения ТК ЕАЭС, локальные регламенты и профили риска. Следовательно, результат поиска определяется не только языковой релевантностью, но и структурной согласованностью с нормативной средой.

Ключевая особенность AIVANT состоит в наличии механизма метакогнитивной верификации вывода. Под данным механизмом понимается оценка пределов собственной применимости модели в конкретной аналитической ситуации. Если объём и качество доступного контекста недостаточны для формирования устойчивого ответа, система не переходит к генерации правдоподобного, но непроверенного вывода. Вместо этого выполняется расчёт доверительного интервала интерпретации и формируется ответ с явным указанием степени достоверности, ограничений применимости и требуемых дополнительных данных.

В результате инспектор получает не категоричное утверждение, а калиброванный аналитический вывод, например: «С высокой вероятностью выявлено занижение таможенной стоимости; для перехода к применению метода б требуется запрос экспортной декларации». Такая форма ответа реализует функцию управляемого отказа, при которой система не подменяет отсутствующие основания генеративной догадкой, а фиксирует границы допустимого вывода. Следовательно, уменьшается вероятность принятия неправомерных решений в условиях неполного информационного обеспечения.

Развёртывание AIVANT предполагается осуществлять исключительно в закрытом контуре на базе ведомственных центров обработки данных ФТС России. Вычислительная обработка, хранение базы знаний и генерация ответов не должны переноситься на локальные рабочие места инспекторов, поскольку в противном случае возрастает риск фрагментации контекста, нарушения требований информационной безопасности и снижения управляемости обновления моделей.

Использование квантизованных моделей малого размера (Small Language Models, 7B–8B параметров) в связке с фреймворками, оптимизированными для серверных CPU-вычислений, например, OpenVINO или Llama.cpp, позволяет отказаться от дорогостоящих внешних GPU-кластеров. Для компенсации ограничений скорости инференса (генерации токенов в секунду) на процессорных мощностях, обработка массивов документов

по ситуации «Класса 1» (аналитическая неопределенность) реализуется через механизм асинхронных фоновых очередей. Нагрузка на элементы системы распределяется согласно модели, приведённой в работе [9].

Таким образом, система заранее формирует справку-обоснование до того, как инспектор откроет дело, что полностью сохраняет оперативность работы должностного лица.

В совокупности архитектура реализует переход от простого риск-скоринга к объяснимому полуавтоматическому контролю после выпуска.

Экономико-математическая модель риска и обработки ситуации

Для формализации решения по ситуации i используется нелинейная функция скоринга:

$$R_i = F(O_i, D_i, C_i, B_i),$$

где F – обучаемая нелинейная модель, которая в прототипе реализована на базе градиентного бустинга над деревьями решений (CatBoost); O_i, D_i, C_i, B_i – агрегированные блоки признаков (OSINT, документарный, цепочки поставок, поведенческий).

Решение по ситуации Y_i (обработка) формируется путём разбиения непрерывной оценки R_i на три класса с помощью пороговых значений τ_1, τ_2 :

$$Y_i = \begin{cases} 0, & R_i < \tau_1, \\ 1, & \tau_1 \leq R_i < \tau_2, \\ 2, & R_i \geq \tau_2. \end{cases}$$

где $Y_i = 0$ соответствует состоянию, при котором контроль после выпуска не требуется; $Y_i = 1$ соответствует состоянию автоматизированной предварительной обработки, включающей генерацию запросов и фоновый мониторинг; $Y_i = 2$ соответствует состоянию, при котором рекомендуется контроль после выпуска.

Пороговые значения τ_1 и τ_2 определяются не эвристически, а посредством минимизации функции ожидаемых операционных потерь $L(\tau_1, \tau_2)$ на валидационной выборке. Поскольку фактическое наличие риска описывается бинарной переменной $y_i \in \{0,1\}$, а множество управляющих решений включает три альтернативы, функция потерь должна учитывать стоимость каждого типа управленческого отклонения. В этом случае потери от решения Y_i относительно фактического класса y_i могут быть заданы выражением:

$$L(\tau_1, \tau_2) = \sum_{i=1}^N (c_{FN} \cdot I(Y_i = 0 \wedge y_i = 1) + c_{process} \cdot I(Y_i = 1) + c_{FP} \cdot I(Y_i = 2 \wedge y_i = 0)),$$

где $I(\cdot)$ – индикаторная функция, принимающая значение 1 при истинности условия и 0 в противном случае; c_{FN} – стоимость пропуска реального риска, интерпретируемая как потенциальный ущерб бюджету или недоимка; $c_{process}$ – стоимость автоматизированной аналитической обработки, включающая вычислительную нагрузку и временные издержки; c_{FP} – стоимость ложного срабатывания, выражающаяся в избыточной административной нагрузке на добросовестный бизнес и инспекторский контур.

Оптимальные значения порогов находятся как решение задачи

$$(\tau_1^*, \tau_2^*) = \arg \min_{\tau_1, \tau_2} L(\tau_1, \tau_2).$$

Такая постановка позволяет не только формировать решение по классу риска, но и балансировать нагрузку между автоматизированным и ручным контурами обработки. Следовательно, снижение числа необоснованных глубоких проверок достигается не за счёт произвольного ужесточения порогов, а за счёт оптимизации на множестве стоимостных ограничений.

Для слоя объяснимости вводится функция интерпретации VERIDIC:

$$E_i = \{(f_j, s_j, p_j, c_j)\}_{j=1}^m,$$

где f_j – признак; s_j – его детерминированный вклад в итоговое решение; p_j – происхождение признака; c_j – уровень доверия к источнику, соответствующий контекстной компоненте γ . В отличие от аппроксимационных методов, основанных на вероятностном семплировании и допускающих стохастическую вариативность результата, алгоритм VERIDIC опирается на структурную трассировку путей в ансамбле деревьев решений. Это обеспечивает аддитивную декомпозицию прогноза, задаваемую равенством:

$$R_i = F_{base} + \sum_{j=1}^m s_j,$$

где F_{base} – базовое значение модели. Из данного равенства следует, что суммарный вклад признаков полностью воспроизводит отклонение прогноза от базового уровня. Отсутствие аппроксимационной погрешности создаёт условия для полной воспроизводимости результата при повторном запуске на одном и том же наборе данных, что критично для аудита решений в таможенных органах.

Следовательно, итоговое решение по ситуации представляется как расширенная структура:

$$\Omega_i = (R_i, Y_i, E_i),$$

где R_i – риск-балл; Y_i – решение по обработке; E_i – вектор детерминированных объяснений. Именно наличие структуры Ω_i , а не только значения R_i , делает систему пригодной для контуров, в которых прогноз должен сопровождаться проверяемым основанием.

Численная апробация экономико-математической модели выполняется на контрольной выборке из 10 ситуаций. В качестве условных стоимостных коэффициентов принимаются: $c_{FN} = 500\,000$ руб. – стоимость пропуска реального риска; $c_{FP} = 50\,000$ руб. – издержки необоснованной проверки добросовестного участника ВЭД; $c_{process} = 5\,000$ руб. – стоимость автоматизированной предварительной обработки средствами AIVANT. Указанный набор коэффициентов используется исключительно как формализованный пример для демонстрации механизма минимизации потерь.

Пошаговый расчёт функции потерь для различных сценариев работы модели представлен в таблице.

Таблица

Расчет вклада ситуаций в функцию операционных потерь

№	Истинный класс (y_i)	Решение модели (Y_i)	Статус классификации	Потери (ℓ_i), руб.
1	0 (нет риска)	0 (нет контроля)	True Negative (Верно)	0
2	1 (риск есть)	2 (проверка)	True Positive (Верно)	0
3	0 (нет риска)	2 (проверка)	False Positive (Ложное срабатывание)	50 000
4	1 (риск есть)	0 (нет контроля)	False Negative (Пропуск риска)	500 000
5	0 (нет риска)	1 (предобработка)	Буферная зона (безопасная проверка)	5 000
6	1 (риск есть)	1 (предобработка)	Буферная зона (безопасная проверка)	5 000

№	Истинный класс (y_i)	Решение модели (Y_i)	Статус классификации	Потери (ℓ_i), руб.
7	0 (нет риска)	0 (нет контроля)	True Negative (Верно)	0
8	1 (риск есть)	2 (проверка)	True Positive (Верно)	0
9	0 (нет риска)	1 (предобработка)	Буферная зона (безопасная проверка)	5 000
10	1 (риск есть)	1 (предобработка)	Буферная зона (безопасная проверка)	5 000

Итоговое значение функции потерь $L(\tau_1, \tau_2)$ для данной конфигурации составит 570 000 руб. Доминирующий вклад в потери вносит пропуск одного реального риска (ситуация № 4). Применение промежуточного класса 1 обходится системе всего в 5 000 руб. за ситуацию, что позволяет направлять сомнительные ситуации на машинную аналитику (генерацию запросов) без критических финансовых и репутационных потерь.

На валидационной выборке алгоритм перебирает пары порогов (τ_1, τ_2) , находя оптимум. Например, смещение порогов к значениям (0,45; 0,75) в симуляции снижает ожидаемые потери до 412 000 руб. за счет балансировки между c_{FN} и c_{FP} .

Формирование структуры Ω_i на примере реальной ситуации

Далее представлено практическое формирование вектора объяснений E_i для декларации на ввоз микросхем (ТН ВЭД 8542):

- риск-балл (R_i): 0,73 (базовое значение модели $F_{base} = 0,14$);
- обработка (Y_i): поскольку $0,73 \geq \tau_2 = 0,65$, принимается решение $Y_i = 2$ (рекомендуется контроль).

Вектор объяснений (E_i). Система генерирует следующий детерминированный набор атрибутов:

- price_deviation: вклад $s_1 = + 0,28$; происхождение $p_1 = \text{FTS_price_db}$; доверие $c_1 = 0,95$;

- hidden_affiliation: вклад $s_2 = + 0,31$; происхождение $p_2 = \text{OSINT_triangulation}$; доверие $c_2 = 0,82$;

- route_anomaly: вклад $s_3 = + 0,19$; происхождение $p_3 = \text{OSINT_graph}$; доверие $c_3 = 0,78$;

- counterparty_age: вклад $s_4 = - 0,12$; происхождение $p_4 = \text{EGRUL_database}$; доверие $c_4 = 0,99$;

- importer_experience: вклад $s_5 = - 0,07$; происхождение $p_5 = \text{customs_history}$; доверие $c_5 = 0,97$.

Проверка аддитивности (математическая гарантия VERIDIC) выполняется абсолютно точно:

$$R_i = 0,14 + (0,28 + 0,31 + 0,19 - 0,12 - 0,07) = 0,73.$$

В машинном представлении структура Ω_i транслируется в систему АИСТ-М в формате JSON с хэшем воспроизводимости (audit trail). При этом к инспектору попадает на один агрегированный балл, а расшифровка, почему именно такой балл получен: «Рост риска вызван занижением цены на 34 % (база ФТС России, доверие 95 %), аффилированность контрагентов (OSINT, доверие 82 %). Факторы, влияющие на снижение риска – срок существования контрагента (ЕГРЮЛ, доверие 99 %). Рекомендовано запросить экспортную декларацию поставщика».

Описанная архитектура предоставляет возможность проводить аудит каждого решения ИИ и конкретные проверяемые аргументы для составления отчёта о проведении таможенной проверки.

Исследовательский прототип и распределение решений

Прототип, представленный в настоящей работе, использует синтетический датасет из 20 000 ситуаций контроля после выпуска, каждая из которых оценивалась по 47 входным признакам. Целевая переменная включает три класса:

- класс 0 (низкий риск) – 7 696 ситуаций (38,48 %);
- класс 1 (средний риск) – 10 080 ситуаций (50,40 %);
- класс 2 (высокий риск) – 2 224 ситуации (11,12 %).

Цели эксперимента на тестовых данных носят архитектурно-методологический характер, а не оценочно-превентивный. Исследование не ставило задачей отразить реальную долю рискованных ситуаций в потоке ФТС России или спрогнозировать их процентное соотношение. Задачи прототипа:

1. Доказать работоспособность VERIDIC в интерпретации нелинейных решений и генерации человеко-читаемых, процессуально обоснованных пояснений («почему инспектор может прийти с проверкой»);

2. Продемонстрировать сквозную отработку всех элементов архитектуры: расследование OSINT → нелинейный скоринг → детерминированное объяснение → маршрутизация ONYX → контекстная поддержка AIVANT.

В отличие от реальной операционной среды ФТС России в моделировании намеренно используется увеличенная доля класса 1 (50,4 %) как стресс-тест для контура ONYX и AIVANT: система должна не «сваливать» половину массива на ручную проверку, а автоматически фильтровать пограничные ситуации через генерацию запросов пояснений и фоновый мониторинг. Такая форма распределения согласуется с официальной логикой ФТС России, согласно которой качественно новый контроль после выпуска должен сочетать риск-ориентированный подход, повышение эффективности проверочных мероприятий и снижение их количества.

Контрольные ситуации и логика объяснения

Наиболее показательна ситуация с высоким риском, когда итоговое решение «рекомендуется контроль после выпуска» формируется по совокупности факторов. VERIDIC выводит детерминированный набор (f_j, s_j, p_j, c_j) , в котором каждый признак сопровождается его происхождением (декларация, логистический трек, открытый реестр, контрагент) и указанием точного вклада в итоговый результат. Это разрешает проблему «чёрного ящика» в работе с ИИ и соответствует многофакторной логике действий инспектора.

Ситуация с низким риском может описывать импортёр с большой предысторией, давней регистрацией, постоянным адресом, низкой ценовой волатильностью и тривиальной логистикой. Ситуация со средним риском характеризует зону неопределённости, в которой некоторые факторы увеличивают риск, а некоторые – снижают его. Именно для такого класса ONYX рекомендует запрос уточняющих документов или выполнение других уточняющих действий через интеллектуальный интерфейс AIVANT, сокращая необходимость ручного вмешательства.

Ограничения исследования и логика дальнейшей проверки

Настоящее исследование имеет очевидные ограничения:

1. Эмпирическая часть основана на синтетическом датасете, а не на историческом массиве ФТС России.

2. Количественные эффекты пока не могут рассматриваться как эксплуатационно подтверждённые KPIs.

3. Архитектура проверена на демонстрационном уровне, а не в реальном процессе.

Именно поэтому корректно говорить не о достигнутом экономическом эффекте, а об ожидаемых метриках пилота. В качестве таких метрик целесообразно рассматривать:

- формальные метрики классификации: точность, полнота, F1-score для высокорискового класса (2), ROC-AUC, калибровочная ошибка;

- операционные метрики: изменение точности доотбора объектов контроля после выпуска, снижение времени первичной аналитической обработки ситуаций, снижение доли необоснованных направлений в глубокий постконтроль, оценка понятности вывода пользователями (Likert-шкала), удобство работы с документами и основаниями.

Все метрики должны фиксироваться на изолированном пилоте, не влияющем на реальные решения в режиме онлайн. Интеграция с АСУ СУР/КПС «Постконтроль» должна осуществляться исключительно через защищённые API с журналированием всех вызовов и результатов в соответствии с требованиями Федеральной службы по техническому и экспортному контролю и внутренними регламентами информационной безопасности ФТС России.

Практические рекомендации

1. Рассматривать внедрение предложенной архитектуры не как масштабный проект, а как низкорисковую пилотную апробацию. Наиболее рациональный формат – изолированный пилот длительностью 3–4 мес. на синтетическом, обезличенном или историческом учебном массиве.

2. Разворачивать пилот исключительно в закрытом контуре. Никакие служебные данные, профили участников ВЭД и результаты аналитики не должны передаваться во внешние облачные сервисы. OSINT-контур должен работать как однонаправленный парсер открытых сигналов, а LLM/RAG-компоненты – как локальное решение на базе квантизованных Small Language Models, оптимизированных под ведомственные вычислительные ресурсы.

3. Запускать пилот по двухэтапной схеме. На первом этапе – апробация на базе профильного вуза или академической площадки с использованием синтетических и обезличенных данных; на втором – ретроспективное тестирование на историческом массиве конкретного таможенного органа под контролем экспертной группы.

4. Обмен данными с АСУ СУР и КПС «Постконтроль» целесообразно реализовать через внутренние защищённые API, в частности REST/gRPC-интерфейсы. Поскольку интерфейсы действующих таможенных систем характеризуются жёсткой табличной структурой и ограниченной изменяемостью экранных форм, интеграция предлагаемой архитектуры не должна предполагать модификацию пользовательского фронтенда АИСТ-М. В противном случае возрастает стоимость внедрения и снижается организационная приемлемость пилота. Текстовые объяснения VERIDIC и сценарии, формируемые средствами RAG-контуров, могут транслироваться двумя способами. Во-первых, краткие выводы могут маршрутизироваться в существующие штатные поля, например, в разделы служебных отметок или описания профиля риска. Во-вторых, развернутый аналитический вывод может формироваться в виде машиночитаемого документа формата XML/PDF с последующим автоматическим прикреплением к электронному досье по конкретной декларации. Такая схема обеспечивает бесшовную доставку сложной аналитики в привычную рабочую среду инспектора без необходимости переработки интерфейсного слоя информационных систем ФТС России.

5. Для таможенного органа польза пилота должна фиксироваться в измеримых категориях. К таким категориям относятся: увеличение адресности контроля, выражаемое как рост доли подтверждённых нарушений при проведении контроля после выпуска; сокращение времени первичной обработки ситуации; сокращение доли решений, впоследствии отменённых по жалобам; число положительных оценок пользователей о том, насколько аргументирован и понятен вывод системы.

6. Для вуза формулировать пользу как формирование центра компетенций. Апробация такой архитектуры на академической площадке даёт базу для магистерских и аспирантских исследований, прикладной учебный стенд по цифровой таможне и возможность стать пилотной площадкой по применению объяснимого ИИ в таможенном контроле.

7. Фиксировать заранее ожидаемые, а не вымышленные KPIs пилота. Корректно задавать диапазоны проверки гипотез: целевой прирост F1-score для класса 2, сокращение времени обработки ситуации на 15–30 %, снижение доли ложных срабатываний класса 2 до <8%, рост пользовательской оценки понятности вывода до > 4.0/5.0. Конкретные значения определяются только после фиксации базовой линии на историческом или учебном массиве.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Цифровая трансформация таможенного контроля в Российской Федерации объективно требует перехода от разрозненных автоматизированных модулей к связанным архитектурам интеллектуальной поддержки принятия решений. Стратегические документы ФТС России и Правительства Российской Федерации прямо закрепляют курс на ИИ, большие данные, автоматизацию контроля после выпуска и повышение обоснованности проверок.

2. Научная и прикладная литература подтверждает перспективность управления рисками на основе данных, применения ИИ в постконтроле, расширение системы поддержки принятия решения за счёт интеграции объяснимого ИИ и OSINT. Однако интегральная модель, объединяющая эти контуры в единую доверенную архитектуру постконтроля, требует снятия введённых ограничений.

3. Предложенная архитектура, включающая контуры OSINT, VERIDIC, ONYX и AIVANT, устраняет разрыв между выявлением сигнала риска, объяснением вывода, выбором операционного сценария и работой с документами и знаниями. VERIDIC обеспечивает детерминированную и воспроизводимую интерпретацию нелинейных решений, выступая альтернативой стохастическим методам атрибуции.

4. Экономико-математическая модель нелинейного риск-скоринга и трёхклассовой маршрутизации показывает, что для постконтроля более адекватна не бинарная логика, а выделение промежуточного класса аналитической неопределённости с автоматизированной предварительной обработкой.

5. Результаты демонстрационного прототипа на синтетических данных нельзя интерпретировать как доказанное внедренческое преимущество, однако они подтверждают внутреннюю логическую связность архитектуры, работоспособность VERIDIC в генерации процессуально значимых объяснений и соответствие стратегическому вектору ФТС России: адресность контроля, объяснимость вывода и снижение числа необоснованных глубоких проверок.

Список источников

1. Vijayakumar S. Technology-centric and Data-Driven Customs Risk Management for Supply Chain Security // World Customs Journal. 2025. Vol. 19. № 1. P. 38–63.

2. Gao Q., Kuang Z. Can robotic process automation technology enable risk data analysis for customs' post-clearance audit: a China customs case study // World Customs Journal. 2023. Vol. 17. № 2. P. 93–104.

3. Афонин П.Н., Лебедева А.Ю. Применение искусственного интеллекта для анализа массива данных, формируемых с использованием интегрированной информационной системы пункта пропуска // Вестник Российской таможенной академии. 2024. № 1. С. 97–112.

4. Прокопенко А.А. Концептуальная модель развития сквозного процесса документального и фактического таможенного контроля // Вестник Российской таможенной академии. 2024. № 1. С. 173–182.

5. Kostopoulos G., Davrazos G., Kotsiantis S. Explainable artificial intelligence–based decision support systems: a recent review // Electronics. 2024. Vol. 13. № 14. P. 2842.

6. Грызунов В.В. Формальный фреймворк для OSINT-нарушителя и защитника // Информационно-управляющие системы. 2025. № 5 (138). С. 22–34. DOI 10.31799/1684-8853-2025-5-22-34

7. Грызунов В.В., Шестаков А.В. Модель системы адаптивного управления киберполигоном МЧС России на основе операторного уравнения // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 6. С. 140–149. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-6-140-149

8. Интеллектуальная система AIVANT для поддержки пользователей и автоматизации продаж: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619865, 08.04.2026. Заявка № 2026618861.

9. Gryzunov V.V. Model of a distributed information system solving tasks with the required probability // Information and Control Systems. 2022. № 1 (116). P. 19–29. DOI 10.31799/1684-8853-2022-1-19-29

References

1. Vijayakumar S. Technology–centric and Data-Driven Customs Risk Management for Supply Chain Security // World Customs Journal. 2025. Vol. 19. № 1. P. 38–63.

2. Gao Q., Kuang Z. Can robotic process automation technology enable risk data analysis for customs' post-clearance audit: a China customs case study // World Customs Journal. 2023. Vol. 17. № 2. P. 93–104.

3. Afonin P.N., Lebedeva A.Yu. Primenenie iskusstvennogo intellekta dlya analiza massiva dannyh, formiruemyh s ispol'zovaniem integrirovannoj informacionnoj sistemy punkta propuska // Vestnik Rossijskoj tamozhennoj akademii. 2024. № 1. S. 97–112.

4. Prokopenko A.A. Konceptual'naya model' razvitiya skvoznogo processa dokumental'nogo i fakticheskogo tamozhennogo kontrolya // Vestnik Rossijskoj tamozhennoj akademii. 2024. № 1. S. 173–182.

5. Kostopoulos G., Davrazos G., Kotsiantis S. Explainable artificial intelligence–based decision support systems: a recent review // Electronics. 2024. Vol. 13. № 14. P. 2842.

6. Gryzunov V.V. Formal'nyj frejmvork dlya OSINT-narushitelya i zashchitnika // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2025. № 5 (138). S. 22–34. DOI 10.31799/1684-8853-2025-5-22-34

7. Gryzunov V.V., Shestakov A.V. Model' sistemy adaptivnogo upravleniya kiberpoligonom MChS Rossii na osnove operatornogo uravneniya // Voprosy kiberbezopasnosti. 2024. № 6. S. 140–149. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-6-140-149

8. Intellektual'naya sistema AIVANT dlya podderzhki pol'zovatelej i avtomatizacii prodazh: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2026619865, 08.04.2026. Zayavka № 2026618861.

9. Gryzunov V.V. Model of a distributed information system solving tasks with the required probability // Information and Control Systems. 2022. № 1 (116). P. 19–29. DOI 10.31799/1684-8853-2022-1-19-29

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.04.2026;
принята к публикации: 29.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 25.03.2026; approved after review: 27.04.2026;
accepted for publication: 29.04.2026

Информация об авторах:

Грызунов Виталий Владимирович, профессор кафедры прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: viv1313r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4866-217X>

Лемихов Иван Владимирович, заместитель начальника центра управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России по Камчатскому краю (683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ленинградская, д. 25), e-mail: bezemo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7712-4277>

Information about authors:

Gryzunov Vitaliy V., professor of the department of applied mathematics and information technology security of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: viv1313r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4866-217X>

Lemikhov Ivan V., deputy head of the crisis management center of Main Directorate of the Kamchatka Territory of EMERCOM of Russia (683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Leningradskaya st., 25), e-mail: bezemo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7712-4277>

Научная статья

УДК 004.056; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-82-91

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

✉ **Лукоянов Алексей Александрович.**

АНО «Проектный офис по развитию туризма и гостеприимства Москвы», Москва, Россия.

Рогозин Евгений Алексеевич.

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия.

Рогозин Руслан Евгеньевич.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Калач Андрей Владимирович.

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия

✉ **9261781233@mail.ru**

Аннотация. Рассматривается задача формирования показателя защищенности информационных систем как инструмента оценки текущего состояния защиты информации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от частных результатов контроля и мониторинга к единой интегральной количественной оценке. Предложена математическая модель показателя, включающая базовую интегральную оценку состояния защищенности и корректирующий коэффициент, учитывающий интегральный показатель остаточного риска. Базовая часть строится на основе взвешенного геометрического среднего частных критериев, отражающих состояние ключевых направлений защиты: выявление угроз и управление уязвимостями, контроль конфигураций и обновлений, управление доступом, мониторинг информационной безопасности, результаты контроля уровня защищенности и способность системы к восстановлению значимых функций. Интегральный показатель остаточного риска характеризует факторы, сохраняющие негативное влияние на состояние защиты информации после учета базовых характеристик защищенности. Научная новизна работы состоит в формализации процедуры расчета показателя защищенности автоматизированных информационных систем в виде аналитической модели, учитывающей как уровень реализации процессов защиты, так и влияние остаточного риска. Практическая значимость заключается в возможности применения подхода при внутреннем контроле защищенности, анализе динамики состояния систем, подготовке управленческих решений и автоматизированном расчете показателя.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационная система, защищенность, показатель защищенности, контроль уровня защищенности, управление уязвимостями, мониторинг информационной безопасности, управление доступом

Для цитирования: Методика формирования показателя защищенности автоматизированных информационных систем / А.А. Лукоянов [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 82–91. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-82-91

Scientific article

**METHODOLOGY FOR DEVELOPING A SECURITY INDEX
FOR AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS**✉ **Lukoyanov Alexey A.****Project office for the development of tourism and hospitality in Moscow, Moscow, Russia.****Rogozin Evgeniy A.****Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia.****Rogozin Ruslan E.****MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia.****Kalach Andrey V.****VRI of the FPS of Russia, Voronezh, Russia**✉ **9261781233@mail.ru**

Abstract. The article considers the problem of forming a security index for information systems as a tool for assessing the current state of information protection. The relevance of the study is determined by the need to move from partial control and monitoring results to a unified integral quantitative assessment. A mathematical model of the index is proposed. The model includes a basic integral assessment of the security state and a corrective coefficient that takes into account an integral residual risk indicator. The basic part is constructed using a weighted geometric mean of partial criteria reflecting key areas of protection: threat identification and vulnerability management, configuration and update control, access management, information security monitoring, security-level control results, and the ability of the system to restore significant functions. The residual risk indicator characterizes factors that continue to have a negative impact on the state of information protection after the basic security characteristics have been taken into account. The novelty of the study lies in the formalization of the procedure for calculating the security index of automated information systems in the form of an analytical model that takes into account both the level of implementation of protection processes and the impact of residual risk. The practical significance lies in the possibility of applying the approach to internal security control, analysis of system dynamics, managerial decision-making, and automated calculation of the index.

Keywords: information security, information system, security, security index, security-level control, vulnerability management, information security monitoring, access management

For citation: Methodology for developing a security index for automated information systems / A.A. Lukoyanov [et al.] // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 82–91. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-82-91

Введение

Проблема количественной оценки защищенности информационных систем занимает важное место в исследованиях по информационной безопасности. В отечественных работах отмечается, что методы оценки защищенности автоматизированных и информационных систем существенно различаются по критериям, математическому аппарату и области применения, а универсальный подход к формированию интегральной оценки защищенности в процессе эксплуатации пока отсутствует [1–3]. Исследования в этой области охватывают сравнительный анализ методов оценки защищенности автоматизированных систем [1], подходы к оценке уровня защищенности информационных систем в процессе эксплуатации [2], а также методики оценивания защищенности на основе семантических моделей метрик и данных [3]. Наряду с этим предложены подходы к комплексной оценке состояния информационной безопасности предприятия и эффективности систем защиты информации [4–6]. Однако такие работы либо ориентированы на более широкий класс задач, либо не связаны непосредственно

с формированием показателя защищенности в соответствии с положениями методического документа Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России) от 12 апреля 2026 г.¹.

В зарубежных исследованиях проблема SecurityMetrics (метрик информационной безопасности) рассматривается как задача построения измеримых, интерпретируемых и контекстно-зависимых показателей для оценки состояния безопасности и поддержки управленческих решений [7–12]. Область метрик информационной безопасности характеризуется терминологической неоднородностью и множественностью подходов [7], требует формальных оснований и увязки с задачами риск-менеджмента [8], а также допускает формализованное представление связи уязвимостей, угроз и механизмов защиты [9]. Метрики информационной безопасности должны разрабатываться с учетом целей организации, особенностей управленческих процессов, класса защищаемой системы и условий ее эксплуатации [10–12].

Целью работы является разработка модели формирования показателя защищенности информационных систем для оценки текущего состояния защиты информации. Для достижения цели решаются задачи обоснования состава частных критериев, разработки математической модели показателя защищенности и демонстрации ее применения на примере.

Материалы и методы исследования

Теоретическую основу исследования составили положения методического документа ФСТЭК России от 12 апреля 2026 г., а также требования к защите информации, закрепленные приказом ФСТЭК России от 11 апреля 2025 г. № 117². При построении модели учитывались положения национальных стандартов в области мониторинга информационной безопасности, регистрации событий безопасности, идентификации и аутентификации, разработки безопасного программного обеспечения и управления компьютерными инцидентами³. Наряду с этим использовались международные подходы к измерению, мониторингу и оценке информационной безопасности⁴. Их учет позволяет рассматривать состояние защиты информации как совокупность измеримых показателей, пригодных для мониторинга, анализа и последующего принятия управленческих решений.

В ходе исследования применялись методы системного анализа, формализации, агрегирования частных критериев и математического моделирования. Методическая логика

¹ Состав и содержание мероприятий и мер по защите информации, содержащейся в информационных системах: метод. документ (утв. ФСТЭК России 12 апр. 2026 г.). Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

² Требования о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений: утв. приказом ФСТЭК России от 11 апр. 2025 г. № 117. Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

³ ГОСТ Р 59547–2021. Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения; ГОСТ Р 59548–2022. Защита информации. Регистрация событий безопасности. Требования к регистрируемой информации; ГОСТ Р 58833–2020. Защита информации. Идентификация и аутентификация. Общие положения; ГОСТ Р 56939–2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования; ГОСТ Р 59710–2022. Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Общие положения. Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

⁴ ISO/IEC 27004:2016. Information technology – Security techniques – Information security management – Monitoring, measurement, analysis and evaluation; ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Guidance on managing information security risks; National Institute of Standards and Technology. NIST SP 800–55 Vol. 1. Measurement Guide for Information Security: Volume 1 – Identifying and Selecting Measures. Gaithersburg, MD, 2024; National Institute of Standards and Technology. NIST SP 800–55 Vol. 2. Measurement Guide for Information Security: Volume 2 – Developing an Information Security Measurement Program. Gaithersburg, MD, 2024

построения показателя определяется рядом исходных положений. Состояние защиты информации изменяется во времени под воздействием организационных и технических факторов. Защищенность информационной системы должна оцениваться по нескольким направлениям, а не по одному частному признаку. Существенные остаточные нарушения не должны полностью компенсироваться высокими значениями иных частных показателей. Итоговый показатель должен быть ограничен заданным интервалом и сохранять интерпретируемость. Совокупность указанных предпосылок обуславливает целесообразность построения двухкомпонентной модели, включающей базовую интегральную оценку и корректирующий коэффициент остаточного риска.

Результаты исследования и их обсуждение

Принципы формирования показателя защищенности информационных систем.

В настоящей работе показатель $K_{зи}$ предлагается формировать на основе пяти принципов: динамичности, нормирования частных критериев, предметной полноты, ограничения взаимной компенсации и учета остаточного риска. Принцип динамичности отражает изменение эффективности мероприятий по защите информации во времени, а принцип предметной полноты требует включения критериев, характеризующих ключевые процессы защиты информации. Ограничение взаимной компенсации реализуется через использование взвешенного геометрического среднего, тогда как учет остаточного риска позволяет отразить факторы, ухудшающие фактическое состояние защищенности.

Математическая модель.

Предлагается рассчитывать показатель защищенности информационной системы по формуле (1).

$$K_{зи}(t) = K_6(t) \cdot K_{кор}(t), \quad (1)$$

где: $K_6(t)$ – базовая интегральная оценка состояния защищенности; $K_{кор}(t)$ – корректирующий коэффициент остаточного риска.

Базовая часть определяется как взвешенное геометрическое среднее частных критериев согласно формуле (2).

$$K_6(t) = (k_{vu}(t)^{w_1} \cdot k_{cf}(t)^{w_2} \cdot k_{ac}(t)^{w_3} \cdot k_{mo}(t)^{w_4} \cdot k_{ct}(t)^{w_5} \cdot k_{rs}(t)^{w_6})^{\frac{1}{\sum_{i=1}^6 w_i}}, \quad (2)$$

где: $k_{vu}(t)$ – частный критерий состояния по угрозам и уязвимостям; $k_{cf}(t)$ – частный критерий конфигурационной целостности и актуальности обновлений; $k_{ac}(t)$ – частный критерий состояния идентификации, аутентификации и управления доступом; $k_{mo}(t)$ – частный критерий мониторинга информационной безопасности и регистрации событий безопасности; $k_{ct}(t)$ – частный критерий результатов контроля уровня защищенности; $k_{rs}(t)$ – частный критерий устойчивости и восстановления значимых функций; w_i – коэффициенты значимости частных критериев.

Состав базовых критериев соответствует структуре процессов защиты информации, закрепленных в методическом документе ФСТЭК России⁵ и профильных стандартах⁶. На рис. 1 представлена схема формирования итогового показателя защищенности на основе частных критериев и факторов остаточного риска.

⁵ Состав и содержание мероприятий и мер по защите информации, содержащейся в информационных системах: метод. документ (утв. ФСТЭК России 12 апр. 2026 г.). Доступ из инф.-правового портала «Гарант»

⁶ ГОСТ Р 59547–2021; ГОСТ Р 59548–2022; ГОСТ Р 58833–2020; ГОСТ Р 56939–2024; ГОСТ Р 59710–2022. ISO/IEC 27004:2016; ISO/IEC 27005:2022; NIST SP 800–55 Vol. 1–2 (Measurement Guide for Information Security), 2024. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».



Рис. 1. Структурная схема формирования показателя защищенности

Интегральный показатель остаточного риска представляет собой агрегированную количественную оценку факторов, сохраняющих негативное влияние на состояние защиты информации после учета базовых характеристик защищенности. К таким факторам относятся остаточные критические уязвимости, несанкционированные подключения, неудовлетворительные результаты контроля уровня защищенности и превышение установленных интервалов восстановления значимых функций. Выделение данного показателя в отдельный элемент модели обусловлено тем, что эти факторы не должны полностью компенсироваться высокими значениями иных частных критериев.

Корректирующий коэффициент остаточного риска предлагается определять через интегральный показатель остаточного риска:

$$K_{\text{кор}}(t) = e^{-\lambda R_{\text{ост}}(t)}, \quad 0 < K_{\text{кор}}(t) \leq 1, \quad (3)$$

где: $\lambda \geq 0$ – коэффициент чувствительности модели к остаточному риску; $R_{\text{ост}}(t)$ – интегральный показатель остаточного риска.

На рис. 2 показана зависимость корректирующего коэффициента остаточного риска от интегрального показателя остаточного риска при трех расчетных сценариях: пониженном ($\lambda = 0,5$), базовом ($\lambda = 1,0$) и повышенном ($\lambda = 1,5$) уровне чувствительности модели. Эти сценарии позволяют сопоставить различные уровни чувствительности модели к остаточному риску при оценке защищенности автоматизированной информационной системы.

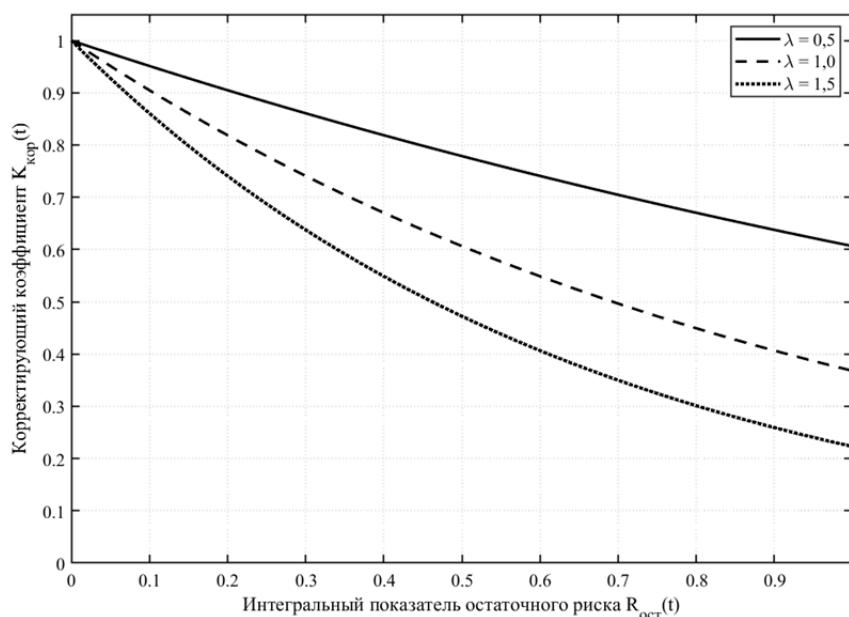


Рис. 2. Зависимость корректирующего коэффициента остаточного риска от интегрального показателя остаточного риска

Представленная зависимость показывает, что при увеличении интегрального показателя остаточного риска корректирующий коэффициент монотонно уменьшается. Коэффициент чувствительности определяет характер этого уменьшения и, соответственно, изменение итогового показателя защищенности при изменении интегрального показателя остаточного риска.

Интегральный показатель остаточного риска определяется по формуле:

$$R_{\text{ост}}(t) = \mu_1 r_v(t) + \mu_2 r_u(t) + \mu_3 r_c(t) + \mu_4 r_r(t), \quad \sum_{j=1}^4 \mu_j = 1, \quad (4)$$

где: $r_v(t)$ – нормированная оценка остаточных критических уязвимостей; $r_u(t)$ – нормированная оценка фактов несанкционированных подключений неразрешенных устройств; $r_c(t)$ – нормированная оценка неудовлетворительных результатов контроля уровня защищенности, включая моделирование реализации актуальных угроз и тренировки; $r_r(t)$ – нормированная оценка нарушений параметров восстановления значимых функций; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – весовые коэффициенты значимости соответствующих компонент интегрального показателя остаточного риска ($\mu_j \in [0; 1]$, $\sum_{j=1}^4 \mu_j = 1$). Значения коэффициентов μ_j задаются экспертно с учетом особенностей автоматизированной информационной системы, значимости защищаемых ресурсов и потенциальных последствий реализации соответствующих факторов риска.

Включение именно этих компонент в формулу (4) обусловлено содержанием методического документа ФСТЭК России. В документе отдельно акцентируются критичность уязвимостей и необходимость их своевременного устранения либо применения компенсирующих мер, выявление несанкционированных подключений, результаты контроля уровня защищенности, а также соблюдение интервалов восстановления значимых функций. Интегральный показатель остаточного риска в предлагаемой модели используется как математический механизм учета факторов, сохраняющих непосредственное влияние на реальное состояние защищенности.

Использование экспоненциальной функции в формуле (3) обусловлено тем, что она обеспечивает ограничение коэффициента в интервале $(0; 1]$, сохраняет непрерывность модели и позволяет регулировать влияние остаточного риска на итоговую оценку. При $R_{\text{ост}}(t) = 0$ коэффициент $K_{\text{кор}}(t)$ равен единице и не изменяет базовую оценку; при росте остаточного риска итоговое значение $K_{\text{зи}}(t)$, определяемое по формуле (1), уменьшается.

Формирование частных критериев.

Каждый частный критерий $k_i(t)$ предлагается рассчитывать по общей нормированной схеме:

$$k_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ij} s_{ij}(t)}{\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ij}}, \quad 0 \leq s_{ij}(t) \leq 1, \quad (5)$$

где: $s_{ij}(t)$ – нормированное значение j – го признака, характеризующего i – е направление защиты; α_{ij} – коэффициент значимости соответствующего признака. Для критерия $k_{vu}(t)$ в качестве признаков могут использоваться доля уязвимостей, устраненных в нормативный срок, доля критических уязвимостей, для которых реализованы компенсирующие меры, полнота актуализации сведений об уязвимостях и качество выявления актуальных угроз. Для критерия $k_{cf}(t)$ признаками могут выступать доля объектов инвентаризации, соответствующих утвержденным конфигурациям, доля выявленных и устраненных несанкционированных изменений, а также доля программных компонентов с актуальными и проверенными обновлениями. Критерий $k_{ac}(t)$ может включать долю учетных записей, отвечающих установленным требованиям идентификации и аутентификации, долю

привилегированных учетных записей, учтенных и контролируемых в установленном порядке, и долю субъектов доступа с минимально необходимыми правами. Критерий $k_{mo}(t)$ может учитывать полноту регистрации событий безопасности, долю источников, подключенных к централизованному сбору событий, своевременность анализа событий, качество корреляции и полноту реагирования. Критерий $k_{ct}(t)$ должен опираться на результаты периодического контроля уровня защищенности, включая долю успешно пройденных проверок, долю невозпроизводимых сценариев реализации актуальных угроз, отсутствие несанкционированных подключений и результаты тренировок. Критерий $k_{rs}(t)$ может строиться на основе доли значимых функций, восстановленных в нормативный интервал времени, полноты резервного копирования, успешности тестов восстановления и наличия ресурсов для непрерывного функционирования.

Расчет.

По результатам очередного периода наблюдения получены следующие значения частных критериев: $k_{vu} = 0,78$; $k_{cf} = 0,88$; $k_{ac} = 0,91$; $k_{mo} = 0,83$; $k_{ct} = 0,74$; $k_{rs} = 0,86$.

Коэффициенты значимости определены на основе экспертного ранжирования частных критериев по степени их влияния на итоговое состояние защищенности рассматриваемой информационной системы. Основанием для такого ранжирования служили назначение системы, значимость защищаемых ресурсов, последствия возможной реализации угроз и результаты фактических контрольных мероприятий. В соответствии с полученным ранжированием более высокие веса были присвоены критериям, характеризующим выявление угроз и уязвимостей, мониторинг информационной безопасности и результаты контроля уровня защищенности. После этого значения коэффициентов были приведены к нормированному виду при условии равенства их суммы единице: $w_1 = 0,22$; $w_2 = 0,15$; $w_3 = 0,20$; $w_4 = 0,18$; $w_5 = 0,15$; $w_6 = 0,10$.

Тогда по формуле (2) базовая интегральная оценка равна: $K_6 = (0,78^{0,22} \cdot 0,88^{0,15} \cdot 0,91^{0,20} \cdot 0,83^{0,18} \cdot 0,74^{0,15} \cdot 0,86^{0,10}) = 0,8299$.

Нормированные показатели остаточного риска имеют значения: $r_v = 0,20$; $r_u = 0,05$; $r_c = 0,10$; $r_r = 0,08$, а их весовые коэффициенты: $\mu_1 = 0,40$; $\mu_2 = 0,20$; $\mu_3 = 0,25$; $\mu_4 = 0,15$.

Тогда по формуле (4) интегральный показатель остаточного риска составит: $R_{ост} = 0,40 \cdot 0,20 + 0,20 \cdot 0,05 + 0,25 \cdot 0,10 + 0,15 \cdot 0,08 = 0,127$.

При $\lambda = 1$ по формуле (3) корректирующий коэффициент остаточного риска равен: $K_{кор} = e^{-0,127} \approx 0,8808$.

Следовательно, по формуле (1) итоговый показатель защищенности автоматизированной информационной системы составит: $K_{зи} = 0,8299 \cdot 0,8808 \approx 0,731$.

Полученный результат показывает влияние остаточного риска на итоговую оценку и подтверждает применимость показателя для количественной оценки состояния защищенности и выбора приоритетных направлений ее повышения.

Анализ и интерпретация результатов. Предложенная модель согласуется с логикой методического документа ФСТЭК России. Использование взвешенного геометрического среднего ограничивает взаимную компенсацию частных критериев, а интегральный показатель остаточного риска обеспечивает учет факторов, существенно влияющих на состояние защиты информации. Модель допускает адаптацию к различным автоматизированным информационным системам за счет настройки состава критериев, весовых коэффициентов и параметра чувствительности.

Заключение

В работе предложена двухкомпонентная модель формирования показателя защищенности автоматизированных информационных систем, включающая базовую интегральную оценку и корректирующий коэффициент остаточного риска. Научный результат состоит в формализации процедуры расчета показателя защищенности, учитывающей уровень реализации ключевых процессов защиты информации и влияние

остаточных критических факторов. Практическая значимость состоит в возможности использования модели для внутреннего контроля защищенности, анализа состояния защищенности систем и обоснования мероприятий по защите информации. Перспективы дальнейших исследований связаны с настройкой весовых коэффициентов, эмпирической апробацией модели и сопоставлением значения $K_{\text{зи}}$ с результатами аттестационных и контрольных мероприятий.

Список источников

1. Ступина А.А., Золотарев А.В. Сравнительный анализ методов решения задачи оценки защищенности автоматизированных систем // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 56–61.
2. Борзенкова С.Ю., Казарина Е.Е. Анализ методов оценки уровня защищенности информационных систем в процессе их эксплуатации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 93–97.
3. Методика оценивания защищенности на основе семантической модели метрик и данных / Е.В. Дойникова [и др.] // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 1 (41). С. 29–40. DOI: 10.21681/2311-3456-2021-1-29-40
4. Александров А.В., Велигура А.В., Соколова Я.В. Методика комплексной оценки состояния информационной безопасности предприятия // Экономический вектор. 2016. № 2 (5). С. 104–112.
5. Комаров В.В., Буйневич М.В. Оценка и мониторинг защищенности информационных ресурсов как нештатная ситуация // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 4. С. 1–14. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-4-1-14
6. Модель оценки эффективности систем защиты информации / Е.С. Митяков [и др.] // Безопасность информационных технологий. 2024. Т. 31. № 4. С. 56–66. DOI: 10.26583/bit.2024.4.03
7. Barabanov R., Kowalski S., Yngström L. Information Security Metrics: State of the P. DSV Report Series. № 11-007. Stockholm: Stockholm University, 2011. 62 p.
8. Trček D. Security Metrics Foundations for Computer Security // The Computer Journal. 2010. Vol. 53. № 7. P. 1106–1112. DOI: 10.1093/comjnl/bxp094
9. Chakraborty A., Sengupta A., Mazumdar C. A Formal Approach to Information Security Metrics // 2012 Third International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT). IEEE, 2012. P. 439–442.
10. Philippou E., Frey S., Rashid A. Contextualising and Aligning Security Metrics and Business Objectives: a GQM-based Methodology // Computers & Security. 2020. Vol. 88. P. 101634. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101634
11. Diesch R., Krcmar H. SoK: Linking Information Security Metrics to Management Success Factors // Proceedings of the 15th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2020). 2020. DOI: 10.1145/3407023.3407059
12. Metrics for Cyber-Physical Security: a Call to Action / G. Gori [et al.] // 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851735
13. A Systematic Analysis of Security Metrics for Industrial Cyber-Physical Systems / G. Gori [et al.] // Electronics. 2024. Vol. 13. № 7. P. 1208. DOI: 10.3390/electronics13071208

References

1. Stupina A.A., Zolotarev A.V. Sravnitel'nyj analiz metodov resheniya zadachi ocenki zashchishchennosti avtomatizirovannyh sistem // Vestnik SibGAU. 2012. № 4 (44). S. 56–61.
2. Borzenkova S.Yu., Kazarina E.E. Analiz metodov ocenki urovnya zashchishchennosti informacionnyh sistem v processe ih ekspluatacii // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2020. № 5. S. 93–97.

3. Metodika ocenivaniya zashchishchennosti na osnove semanticheskoy modeli metrik i dannyh / E.V. Dojnikova [i dr.] // Voprosy kiberbezopasnosti. 2021. № 1 (41). S. 29–40. DOI: 10.21681/2311-3456-2021-1-29-40
4. Aleksandrov A.V., Veligura A.V., Sokolova Ya.V. Metodika kompleksnoj ocenki sostoyaniya informacionnoj bezopasnosti predpriyatiya // Ekonomicheskij vektor. 2016. № 2 (5). S. 104–112.
5. Komarov V.V., Bujnevich M.V. Ocenka i monitoring zashchishchennosti informacionnyh resursov kak neshtatnaya situaciya // Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2023. T. 11. № 4. S. 1–14. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-4-1-14
6. Model' ocenki effektivnosti sistem zashchity informacii / E.S. Mityakov [i dr.] // Bezopasnost' informacionnyh tekhnologij. 2024. T. 31. № 4. S. 56–66. DOI: 10.26583/bit.2024.4.03
7. Barabanov R., Kowalski S., Yngström L. Information Security Metrics: State of the P. DSV Report Series. № 11-007. Stockholm: Stockholm University, 2011. 62 p.
8. Trček D. Security Metrics Foundations for Computer Security // The Computer Journal. 2010. Vol. 53. № 7. P. 1106–1112. DOI: 10.1093/comjnl/bxp094
9. Chakraborty A., Sengupta A., Mazumdar C. A Formal Approach to Information Security Metrics // 2012 Third International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT). IEEE, 2012. P. 439–442.
10. Philippou E., Frey S., Rashid A. Contextualising and Aligning Security Metrics and Business Objectives: a GQM-based Methodology // Computers & Security. 2020. Vol. 88. P. 101634. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101634
11. Diesch R., Krcmar H. SoK: Linking Information Security Metrics to Management Success Factors // Proceedings of the 15th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2020). 2020. DOI: 10.1145/3407023.3407059
12. Metrics for Cyber-Physical Security: a Call to Action / G. Gori [et al.] // 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851735
13. A Systematic Analysis of Security Metrics for Industrial Cyber-Physical Systems / G. Gori [et al.] // Electronics. 2024. Vol. 13. № 7. P. 1208. DOI: 10.3390/electronics13071208

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 21.03.2026; одобрена после рецензирования: 26.04.2026;
принята к публикации: 30.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 21.03.2026; approved after review: 26.04.2026;
accepted for publication: 30.04.2026

Информация об авторах:

Лукоянов Алексей Александрович, специалист по информационной безопасности АНО «Проектный офис по развитию туризма и гостеприимства Москвы» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 5А), e-mail: 9261781233@mail.ru

Рогозин Евгений Алексеевич, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Воронежского института МВД России (394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, д. 53), доктор технических наук, профессор, e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4455-7535>, SPIN-код: 4965-3462

Рогозин Руслан Евгеньевич, доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78), кандидат технических наук, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2913-6038>

Калач Андрей Владимирович, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А), доктор химических наук, профессор, почетный работник сферы образования Российской Федерации, e-mail: biizssgt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN-код: 2584-7456

Information about authors:

Lukoyanov Alexey A., information security specialist at the project office for the development of tourism and hospitality in Moscow (125009, Moscow, Tverskaya st., 5A), e-mail: 9261781233@mail.ru

Rogozin Evgeny A., professor of the department of automated information systems of law enforcement agencies of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia (394065, Voronezh, Patriotov ave., 53), doctor of technical sciences, professor, e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4455-7535>, SPIN: 4965-3462

Rogozin Ruslan E., associate professor of the department of corporate information systems at the Institute of information technology of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), candidate of technical sciences, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2913-6038>

Kalach Andrey V., head of the department of information security and protection of information constituting a state secret of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A), doctor of chemical sciences, professor, honorary worker of education of the Russian Federation, e-mail: biizssgt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN: 2584-7456

Научная статья

УДК 004.051; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-92-103

ФУНКЦИЯ ПРИСУТСТВИЯ КАК МЕХАНИЗМ КОРРЕКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОПУЩЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ В НЕЧЁТКОМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

✉ **Максимова Елена Александровна.**

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия.

Утешева Гульнара Шаукатовна.

Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет,

г. Уральск, Казахстан.

Громов Юрий Юрьевич.

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия.

Карасев Павел Игоревич;

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Стародубов Константин Владимирович.

НИУ ВШЭ, Москва, Россия

✉ maksimova@mirea.ru

Аннотация. Когда данные неполны, стандартные методы нечёткого интеллектуального анализа оказываются в ситуации, которую трудно назвать приемлемой: удаление объектов с пропусками теряет до трети выборки и вносит систематическое смещение при MAR-механизме, а импутирование средним разрушает ковариационную структуру и порождает правила с искусственно завышенной поддержкой. В работе предлагается иной выход – функция присутствия $\varphi: U \times A \rightarrow [0, 1]$, встраивающая обработку пропусков прямо в формулу нечёткой поддержки. Объект с пропущенным атрибутом не выбрасывается и не «лечится»: он участвует в анализе с пониженным весом φ_0 , а всё остальное делает t-норма. Доказан ряд теоретических свойств: антимонотонность поддержки для произвольной t-нормы, устойчивость к атрибутивному шуму через константу Липшица, инвариантность к монотонным масштабным преобразованиям, предельные случаи $\varphi_0 \rightarrow 0$ и $\varphi_0 \rightarrow 1/k_a$. При MCAR-пропусках 30 % и значении $\varphi_0 = 0,3$ доля восстановленных закономерностей оказывается на 21–38 п.п. выше, чем при listwise deletion. Предложены три стратегии построения нечётких разбиений: равномерная, квантильная и оптимизационная. Детально исследована зависимость качества извлекаемых закономерностей от параметра φ_0 при различных механизмах пропусков. Экспериментальное сравнение на синтетических данных подтвердило, что $\varphi_0 = 0,3$ при MCAR-пропусках обеспечивает на 21–38 п.п. более высокую долю восстановленных закономерностей, чем стратегия listwise deletion, при уровне пропусков 30 %.

Ключевые слова: функция присутствия, неполные данные, нечёткий интеллектуальный анализ данных, нечёткая информационная система, механизмы пропусков MCAR/MAR/MNAR, нечёткие разбиения, антимонотонность нечёткой поддержки, t-норма, импутирование, listwise deletion

Для цитирования: Функция присутствия как механизм корректной обработки пропущенных значений в нечётком интеллектуальном анализе данных / Е.А. Максимова [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 92–103. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-92-103

Scientific article

PRESENCE FUNCTION AS A MECHANISM FOR CORRECT HANDLING OF MISSING VALUES IN FUZZY DATA MINING

✉ Maximova Elena A.

Moscow technical university of communications and informatics, Moscow, Russia.

Utesheva Gulnara Sh.

West Kazakhstan university of innovation and technology, Uralsk, Kazakhstan.

Gromov Yuriy Yu.

Tambov state technical university, Tambov, Russia.

Karasev Pavel I.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia.

Starodubov Konstantin V.

National research university higher school of economics, Moscow, Russia

✉ maksimova@mirea.ru

Abstract. When data are incomplete, standard fuzzy data mining methods face an unacceptable trade-off: deleting objects with missing values loses up to a third of the sample and introduces systematic bias under the MAR mechanism, while mean imputation destroys the covariance structure and produces rules with artificially inflated support. This paper proposes a different solution – a presence function $\varphi: U \times A \rightarrow [0, 1]$ that embeds the handling of missing values directly into the fuzzy support formula. An object with a missing attribute is neither discarded nor «repaired»: it participates in the analysis with a reduced weight φ_0 , and the rest is handled by the t-norm. A number of theoretical properties are proved: anti-monotonicity of support for an arbitrary t-norm, robustness to attribute noise via the Lipschitz constant, invariance to monotone scale transformations, and the limiting cases $\varphi_0 \rightarrow 0$ and $\varphi_0 \rightarrow 1/k_a$. Under 30 % MCAR missingness with $\varphi_0 = 0,3$, the share of recovered patterns is 21–38 percentage points higher than with listwise deletion. Three strategies for constructing fuzzy partitions are proposed: uniform, quantile-based and optimization-based. The dependence of the quality of extracted patterns on the parameter φ_0 under different missingness mechanisms is studied in detail. An experimental comparison on synthetic data confirmed that $\varphi_0 = 0,3$ under MCAR missingness provides a 21–38 percentage point higher share of recovered patterns than listwise deletion at a 30 % missingness level.

Keywords: presence function, incomplete data, fuzzy data mining, fuzzy information system, MCAR/MAR/MNAR missingness mechanisms, fuzzy partitions, anti-monotonicity of fuzzy support, t-norm, imputation, listwise deletion

For citation: Presence function as a mechanism for correct handling of missing values in fuzzy data mining / E.A. Maksimova [et al.] // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 92–103. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-92-103

Введение

Проблема неполных данных является одной из наиболее распространённых и практически значимых в современном интеллектуальном анализе данных (ИАД). Исходя из ряда прикладных исследований, от 5 до 40 % значений атрибутов в реальных медицинских, промышленных, финансовых и телекоммуникационных базах данных оказываются пропущенными [1]. Причины пропусков разнообразны: отказ оборудования, нежелание респондентов отвечать на отдельные вопросы, потеря данных при передаче, ограничения измерительных систем. Вне зависимости от причин, наличие пропусков существенно усложняет применение стандартных аналитических методов.

Классические методы нечёткого ИАД – нечёткие обобщения алгоритма Apriori [2, 3], алгоритмы нечёткой классификации [4] и нечёткой кластеризации FCM [5] – предполагают полноту данных. Нечёткая поддержка набора элементов I вычисляется как среднее степеней

выполнения по всем объектам, но степень выполнения $\tau_I(u)$ не определена, если для некоторого атрибута $a \in I$ значение $f(u, a)$ отсутствует.

Традиционный ответ на эту проблему – удаление неполных объектов (listwise deletion, LD) или предварительное импутирование отсутствующих значений. Оба подхода имеют существенные ограничения. Listwise deletion при механизме MAR вносит систематическое смещение в оценки поддержки [6]; при $p = 30\%$ исключается до 30 % объектов выборки, что значительно снижает статистическую мощность обнаружения закономерностей. Импутирование средним занижает дисперсию атрибута, нарушает ковариационную структуру данных и порождает артефактные закономерности с завышенной поддержкой.

В настоящей работе предлагается принципиально иной подход, при котором обработка пропусков интегрируется непосредственно в механизм вычисления нечёткой поддержки посредством функции присутствия $\varphi(u, a) \in [0, 1]$. Объект с пропущенным значением не исключается из анализа и не подвергается искусственному восстановлению; вместо этого его вклад в поддержку закономерности взвешивается на коэффициент $\varphi_0 < 1$, отражающий неопределённость значения атрибута. При $\varphi_0 = 0$ метод деградирует до listwise deletion; при $\varphi_0 \rightarrow 1$ пропуски игнорируются. Оптимальное значение $\varphi_0 = 0,3$ обеспечивает наилучший баланс между чувствительностью и специфичностью обнаружения закономерностей при MCAR-пропусках.

Классификация механизмов пропусков. Литтл и Рубин [6] установили три принципиально различных механизма возникновения пропусков, определяющих применимость различных методов обработки.

Механизм MCAR (Missing Completely At Random): вероятность пропуска атрибута a для объекта u не зависит ни от наблюдаемых, ни от ненаблюдаемых значений: $P(\tilde{f}(u, a) = * | f(u, a), X_{obs}) = const$. Пример: случайный отказ датчика, не связанный с измеряемой величиной. При MCAR выборка неполных объектов является случайной подвыборкой всей выборки, поэтому статистические оценки не смещены – только менее точны.

Механизм MAR (Missing At Random): вероятность пропуска зависит только от наблюдаемых значений других атрибутов: $P(\tilde{f}(u, a) = * | f(u, a), X_{obs}) = P(\tilde{f}(u, a) = * | X_{obs})$. Пример: пациенты с высоким давлением чаще пропускают тест на холестерин. При MAR listwise deletion вносит систематическое смещение, однако корректная обработка возможна без прямого моделирования пропускового механизма.

Механизм MNAR (Missing Not At Random): вероятность пропуска зависит от пропущенного значения: $P(\tilde{f}(u, a) = * | f(u, a), X_{obs}) \neq P(\tilde{f}(u, a) = * | X_{obs})$. Пример: пациенты с очень высоким давлением отказываются его измерять. При MNAR все стандартные методы потенциально смещены; необходимо явное моделирование механизма пропусков.

Существующие методы обработки пропусков. Listwise deletion исключает из анализа все объекты, у которых хотя бы один атрибут из рассматриваемого набора пропущен. Метод прост в реализации и не требует дополнительных предположений при MCAR. Однако при $p > 15\%$ и MAR-механизме потери информации становятся неприемлемыми: при $p = 30\%$ и 10 атрибутах (независимые MCAR-пропуски) эффективный размер выборки снижается до $n \cdot (1 - 0,3)^{10} \approx 0,028 \cdot n$, то есть лишь 2,8 % объектов сохраняются.

Pairwise deletion использует объекты с пропусками при вычислении попарных статистик, объединяя только доступные пары. Применим к некоторым видам статистик, но не к нечётким поддержкам наборов мощности > 2 .

Импутирование средним (Mean Imputation): пропущенное значение заменяется средним по атрибуту в обучающей выборке. Не теряет объектов, но занижает стандартное отклонение атрибута и разрушает ковариационную структуру данных. В нечётком ИАД приводит к систематически завышенным оценкам нечётких поддержек: все объекты с пропущенным атрибутом принимают одно и то же «среднее» значение, концентрируя степени принадлежности вокруг соответствующего нечёткого термина [7].

Кратное импутирование решает проблему иначе: строится $m = 5\text{--}20$ независимых полных наборов данных, на каждом отдельно проводится анализ, результаты объединяются по правилам Рубина [8]. Статистически это корректно при MAR, однако за корректность приходится платить: нужно знать или моделировать совместное распределение атрибутов, а вычислительная нагрузка возрастает в m раз, что в нечётком ИАД на больших наборах становится ощутимым ограничением.

ЕМ-алгоритм идёт ещё дальше, максимизируя логарифм правдоподобия при предположении о нормальности. На «правильных» данных это работает хорошо, но реальные промышленные и медицинские наборы редко бывают нормально распределены, и тогда ЕМ-оценки оказываются смещены [9].

Функция присутствия принципиально выбивается из этого ряда: она вообще не восстанавливает значения. Неопределённость, порождённая пропуском, просто переходит в вес объекта при вычислении поддержки – и больше ничего. Никаких предположений о распределении, никакого роста вычислительных затрат. Проблема неполных данных является одной из наиболее распространённых и практически значимых в современном интеллектуальном анализе данных (ИАД) [10].

В задачах нечёткого поиска ассоциативных правил (FARM) Хонг, Куо и Чи [2] предложили первое нечёткое обобщение алгоритма Apriori [11]. QuantMiner [12] применяет генетический алгоритм для совместного поиска нечётких разбиений и правил. Делгадо и соавторы [3] разработали обобщённую модель нечётких ассоциативных правил. Все три метода предполагают полноту данных. В задачах нечёткой классификации метод Исибути [4] и генетические нечёткие системы Кордона–Эррера [13] также не включают механизма обработки пропусков. Таким образом, настоящая работа восполняет существенный пробел в теории нечёткого ИАД.

Методы исследования

Определение 1 (Информационная система). Информационной системой (ИС) называется четвёрка $IS = (U, A, V, f)$, где $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ – конечное непустое множество объектов; $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ – конечное непустое множество атрибутов; $V = \bigcup V_a$ – объединённое множество значений атрибутов; $f: U \times A \rightarrow V$ – информационная функция.

Расширением ИС является информационная система с пропусками, в которой допускается $\tilde{f}(u, a) = *$, где $*$ $\notin V$ – символ пропуска. Долю пропусков по атрибуту a обозначим: $\rho_a = |\{u \in U : \tilde{f}(u, a) = *\}| / |U|$.

Определение 2 (Нечётко заданная информационная система, FIS). $FIS = (U, A, \Omega, \tilde{f}, \varphi, C)$, где $\Omega = \{\Omega_a\}$ – семейство нечётких разбиений; $\tilde{f}: U \times A \rightarrow V \cup \{*\}$ – расширенная информационная функция; $\varphi: U \times A \rightarrow [0, 1]$ – функция присутствия; C – множество целевых классов.

Определение 3 (Функция присутствия). Функция присутствия $\varphi(u, a)$ задаётся правилом:

$$\begin{aligned} \varphi(u, a) &= 1, \text{ если } \tilde{f}(u, a) \neq * \text{ (значение известно);} \\ \varphi(u, a) &= \varphi_0 \in (0, 1), \text{ если } \tilde{f}(u, a) = * \text{ (значение пропущено);} \\ \varphi(u, a) &= 0, \text{ если атрибут неприменим к объекту.} \end{aligned}$$

Параметр $\varphi_0 \in (0, 1)$ – единственный гиперпараметр модели, определяющий степень доверия к «усреднённому» вкладу неполного объекта [14]. Интерпретация функции присутствия $\varphi(u, a) = 1$ означает полную уверенность в значении атрибута; $\varphi(u, a) = \varphi_0$ означает частичную уверенность – объект с пропуском «частично присутствует» в анализе по данному атрибуту; $\varphi(u, a) = 0$ означает, что атрибут a не применим к объекту u (например, атрибут «срок беременности» для мужчин).

Определение 4 (Степень выполнения). Степень выполнения нечёткого набора $I = \{(a_1, j_1), \dots, (a_s, j_s)\}$ для объекта u :

$$\tau_I(u) = T_{\{(a,j) \in I\}} [\varphi(u, a) \cdot \mu_j^a(\tilde{f}(u, a))],$$

где T – t -норма [15]. При пропущенном значении $\tilde{f}(u, a) = *$ применяется «индуктивное распространение» по термам разбиения:

$$\tau_{\{a,*\}}(u) = \varphi_0 \cdot (1/k_a) \cdot \sum_{j=1..k_a} \mu_j^a(\tilde{c}_j), \quad (1)$$

где $\tilde{c}_j$ – центр j -го терма разбиения Ω_a , k_a – число термов атрибута a . Формула (1) означает, что объект с пропущенным значением вносит вклад, эквивалентный вкладу объекта с равновесным распределением принадлежности по всем термам, умноженному на φ_0 .

Определение 5 (Нечёткая поддержка). Нечёткой поддержкой набора I в FIS называется:

$$fsupp(I) = (1/|U|) \cdot \sum_{u \in U} \tau_I(u).$$

Теорема 1 (Корректность FIS). $fsupp(I) \in [0, 1]$ для любого набора I .

Доказательство. $\tau_I(u) = T[\varphi(u, a) \cdot \mu_j^a(\dots)] \in [0, 1]$ ($\varphi \in [0, 1]$, $\mu \in [0, 1]$, $T: [0, 1]^k \rightarrow [0, 1]$). Среднее значений из $[0, 1]$ лежит в $[0, 1]$.

Нечёткая достоверность правила R : $I_{ant} \Rightarrow I_{con}$:

$$fconf(R) = fsupp(I_{ant} \cup I_{con}) / fsupp(I_{ant}), fsupp(I_{ant}) > 0.$$

Интегральный критерий значимости (ИКЗ):

$$IQ(R) = \alpha \cdot fsupp(R) + \beta \cdot fconf(R) + \gamma \cdot SC(R), \quad \alpha + \beta + \gamma = 1,$$

где $SC(R)$ – семантическая связность: $SC(R) = (1/(|I_{ant}| \cdot |I_{con}|)) \cdot \sum_{a \in I_{ant}} \sum_{b \in I_{con}} LS(T_a, T_b)$; $LS(T_i, T_j) = \int \min(\mu_i, \mu_j) dx / \int \max(\mu_i, \mu_j) dx$ – коэффициент Жаккара для нечётких термов.

Теорема 2 (Антимонотонность). Для любой t -нормы T и любых нечётких наборов $I \subseteq J$: $fsupp(J) \leq fsupp(I)$.

Доказательство. Пусть $J = I \cup \{(a', j')\}$, $I \cap \{(a', j')\} = \emptyset$. Для любого $u \in U$:

$$\tau_J(u) = T(\tau_I(u), \varphi(u, a') \cdot \mu_{j'}^{a'}(\tilde{f}(u, a'))).$$

Из аксиом t -нормы: $T(a, b) \leq T(a, 1) = a$ для всех $a, b \in [0, 1]$. Следовательно, $\tau_J(u) \leq \tau_I(u)$ для всех $u \in U$. Суммируя по U и деля на $|U|$: $fsupp(J) \leq fsupp(I)$.

Следствие 1. Если $fsupp(I) < \sigma_{min}$ (набор нечастый), то для любого надмножества $J \supseteq I$: $fsupp(J) < \sigma_{min}$. Это свойство инвариантно к выбору t -нормы и является теоретическим основанием для сокращения пространства поиска в алгоритме ФАРМ-ИНД: при обнаружении нечастого набора I все его надмножества отсекаются без вычисления их поддержки.

Лемма 1 (Устойчивость к шуму). Пусть $f_{obs}(u, a) = f_{true}(u, a) + \varepsilon$, $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2_{\varepsilon})$. Тогда:

$$E[|fsupp(I; f_{obs}) - fsupp(I; f_{true})|] \leq L_j^a \cdot \sigma_{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $L_j^a = \sup_x |d\mu_j^a/dx|$ – константа Липшица ФП μ_j^a . Для треугольной ФП с полушириной w : $L_j^a = 1/w$; для гауссовой ФП: $L_j^a = 1/(\sigma_G \cdot \sqrt{e})$.

Доказательство. По неравенству Липшица: $|\mu_j^a(x+\varepsilon) - \mu_j^a(x)| \leq L_j^a \cdot |\varepsilon|$. Поскольку $\varphi(u, a) \in [0,1]$, $|\varphi(u, a) \cdot \mu_j^a(f_{\text{obs}}) - \varphi(u, a) \cdot \mu_j^a(f_{\text{true}})| \leq L_j^a \cdot |\varepsilon|$. Через свойство t-нормы и линейность ожидания: $E[|\tau_I(u; f_{\text{obs}}) - \tau_I(u; f_{\text{true}})|] \leq L_j^a \cdot E[|\varepsilon|] \leq L_j^a \cdot \sigma_\varepsilon$. Усредняя по U , получается (2).

Следствие 2. Следствие 2 имеет прямой практический смысл. Чёткая дискретизация – это пороговая функция: ошибка измерения δ вблизи границы терма мгновенно переводит объект из одного класса в другой. Нечёткий подход ведёт себя по-другому: та же ошибка δ меняет степень принадлежности не более чем на $L_{ij}^a \cdot \delta$, то есть «плавно». Из этого напрямую следует рекомендация по числу термов: при $k_a = 3-4$ ширина термов достаточно велика, L_{ij}^a мало – и система устойчива. При $k_a \geq 6$ термы сужаются, L_{ij}^a растёт, и устойчивость к шуму ухудшается.

Утверждение 1 (Инвариантность). Пусть $g: V_a \rightarrow V_a$ – строго возрастающее отображение, $\mu_j^a\{a, \text{new}\}(x) = \mu_j^a\{a, \text{old}\}(g^{-1}(x))$. Тогда $\text{fsupp}(I; \tilde{f}_{\text{new}}, \Omega_{\text{new}}) = \text{fsupp}(I; \tilde{f}_{\text{old}}, \Omega_{\text{old}})$.

Доказательство. $\mu_j^a\{a, \text{new}\}(f_{\text{new}}(u, a)) = \mu_j^a\{a, \text{old}\}(g^{-1}(g(f_{\text{old}}(u, a)))) = \mu_j^a\{a, \text{old}\}(f_{\text{old}}(u, a))$. Следовательно, $\tau_I(u)$ не изменяется для всех $u \in U$.

Утверждение 1 – это в том числе сугубо практическая вещь. Например, если атрибут «Доход» измерялся в рублях, а потом данные пересчитали в тысячи рублей, пересчитывать нечёткие разбиения не нужно: достаточно применить то же монотонное преобразование к функциям принадлежности, и все поддержки останутся прежними [16]. Это заметно упрощает препроцессинг и делает разбиения переносимыми между версиями набора данных.

Теорема 3 (Предельные случаи). (а) При $\varphi_0 = 0$: fsupp с функцией присутствия совпадает с fsupp , вычисленной по объектам без пропусков (listwise deletion). (б) При $\varphi_0 = 1/k_a$ для каждого $a \in A$: объект с пропуском вносит усреднённый вклад, эквивалентный объекту с равномерно распределённой принадлежностью по всем термам.

Доказательство (а). При $\varphi_0 = 0$ и $\tilde{f}(u, a) = *$: $\tau_I(u)|_a = \varphi_0 \cdot (...) = 0$. Следовательно, $T[..., 0, ...] = 0$ (граничное условие t-нормы). Объекты с пропуском вносят нулевой вклад, что эквивалентно их исключению. Доказательство (б) непосредственно следует из формулы (1) при $\varphi_0 = 1/k_a$.

Теорема 4 (Выбросы). Пусть объект u_0 является выбросом по атрибуту a с пониженным коэффициентом $\varphi_{\text{out}} \in [0,1]$. Тогда вклад u_0 в fsupp любого набора I , содержащего условие по a , не превышает $\varphi_{\text{out}}/|U|$.

Доказательство. $\tau_I(u_0) \leq \varphi_{\text{out}} \cdot \max_x \mu_j^a(x) = \varphi_{\text{out}}$ (нормальное нечёткое множество, $\max = 1$). Вклад u_0 в $\sum_u \tau_I(u) \leq \varphi_{\text{out}}$; делённый на $|U|$ – оценка вклада в fsupp .

Стратегии построения нечётких разбиений. Определение 6 (Нечёткое разбиение). Нечётким разбиением числового атрибута a называется набор $\Omega_a = \{A_1^a, \dots, A_{k_a}^a\}$, где каждое A_j^a – нормальное выпуклое нечёткое множество с ФП $\mu_j^a: V_a \rightarrow [0,1]$, удовлетворяющий: (i) $\forall x \in V_a \exists j: \mu_j^a(x) > 0$; (ii) $\forall x \in V_a: \sum_j \mu_j^a(x) = 1$ [17, 18].

Условие (ii) обеспечивает, что объект с известным значением x вносит «полный» суммарный вклад 1 по данному атрибуту: $\sum_j \varphi(u, a) \cdot \mu_j^a(x) = 1$ при $\varphi(u, a) = 1$. Условие (i) гарантирует, что каждое значение x «охвачено» хотя бы одним термом.

Стратегия UNI (равномерная). Центры термов равномерно распределены на $[x_{\text{min}}, x_{\text{max}}]$:

$$c_j^a = x_{\text{min}} + (j-1) \cdot (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) / (k_a - 1), j = 1, \dots, k_a.$$

Ширины перекрытия соседних термов: $\sigma_j^a = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) / (k_a - 1)$. UNI применима при равномерном или приближённо равномерном распределении данных. Преимущества: простота, воспроизводимость, нечувствительность к выбросам. Недостаток: плохая адаптация к асимметричным распределениям и данным с несколькими модами.

Стратегия QNT (квантильная). Центры совпадают с квантилями эмпирического распределения:

$$c_j^a = Q((j-1)/(k_a-1)), j = 1, \dots, k_a,$$

где $Q(p)$ – квантиль уровня p распределения $\{f(u, a) : u \in U, \tilde{f}(u, a) \neq *\}$. Квантили вычисляются только по объектам с известными значениями. Стратегия QNT адаптирует разбиение к фактическому распределению данных: в области высокой плотности центры термов расположены плотнее, что обеспечивает лучшее разрешение именно там, где данных больше. При выраженной скошенности (коэффициент асимметрии > 1) или бимодальности QNT существенно превосходит UNI по качеству обнаруживаемых закономерностей.

Стратегия OPT (оптимизационная). Параметры разбиения $\theta_a = (c_1^a, \dots, c_{k_a}^a, \sigma_1^a, \dots, \sigma_{k_a}^a)$ находятся из задачи:

$$\theta_a^* = \operatorname{argmax} \Psi(\text{FIS}(\theta_a)), \quad (3)$$

где Ψ – целевая функция (Macro-F1 или средний ИКЗ), оцениваемая посредством трехкратной CV. Задача (3) является многомодальной нелинейной оптимизацией с ограничением монотонности центров $c_1^a < c_2^a < \dots < c_{k_a}^a$. Решается методом PSO-FCM [19]: рой из $N_{\text{swarm}} = 30$ частиц ищет глобально перспективные области за $T_{\text{ps}} = 50$ итераций, затем для топ-5 частиц запускается локальная настройка методом L-BFGS-B. Данная задача может быть реализована средствами MATLAB [20].

Вычислительная сложность OPT: $O(N_{\text{swarm}} \cdot T_{\text{ps}} \cdot |U| \cdot m + N_{\text{local}} \cdot T_{\text{lbfgs}} \cdot |U| \cdot m)$. При типичных параметрах – около 2 000 вычислений целевой функции Ψ . При $|U| = 1\,000$ это осуществимо за несколько мин. На практике, если нет ни времени на полную оптимизацию, ни уверенности в равномерности распределения, QNT – разумный выбор по умолчанию: она адаптируется к реальной форме данных, не требует итераций и воспроизводима. Сравнение стратегий построения нечётких разбиений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение стратегий построения нечётких разбиений

Характеристика	UNI	QNT	OPT
Адаптация к распределению данных	Нет	Да	Да (полная)
Вычислительная сложность	$O(k_a)$	$O(n \log n)$	$O(N \cdot T \cdot n \cdot m)$
Устойчивость к выбросам	Низкая	Средняя	Высокая
Воспроизводимость	Полная	Полная	Зависит от seed
Требование к объёму данных	Нет	$n > 50$	$n > 200$
Рекомендуемое применение	Равномерное распределение	Большинство задач	Высокая точность

Результаты исследования и их обсуждение

Параметр ϕ_0 – это единственный регулятор модели, и его смысл интуитивен: насколько можно доверять объекту, у которого чего-то не хватает. Слишком маленькое ϕ_0 – и неполные объекты почти исчезают из анализа, теряется информация. Слишком большое – и алгоритм начинает «додумывать» за пропуски равномерно по всем термам, что порождает ложные закономерности. Между этими двумя полюсами и находится оптимум.

При MCAR такой оптимум ϕ_0^* существует и определяется тремя вещами: долей пропусков p , числом термов k_a и тем, насколько «чёткими» являются истинные закономерности в данных. Это не позволяет задать ϕ_0^* аналитически в общем виде, однако эмпирика на синтетических и реальных данных устойчиво указывает на диапазон $[0,2; 0,4]$ при MCAR.

При механизме MAR оптимальное ϕ_0 зависит от ковариационной структуры: если пропуск атрибута a коррелирует с другими атрибутами из набора I , ϕ_0 следует уменьшить (ближе к 0), чтобы снизить смещение. При MNAR корректное значение ϕ_0 требует знания механизма пропусков.

На синтетических данных (нормальная смесь, 3 компоненты, 10 атрибутов, $n = 500$, MCAR) при $\rho = 20\%$ варьировалось $\phi_0 \in \{0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0\}$. Оценивались: % Recovery – доля истинных правил из $P_{\text{true}} = 12$, % False – доля ложных обнаруженных правил (табл. 2).

Таблица 2

Влияние ϕ_0 на качество ФАРМ-ИНД при $\rho = 20\%$, MCAR (иллюстративные значения)

ϕ_0	% Recovery	% False	Avg fsupp	Avg IQ	Эквивалент
0,0	67	8	0,15	0,57	Listwise deletion
0,1	79	5	0,18	0,62	Слабый учёт
0,2	89	4	0,20	0,67	Умеренный учёт
0,3	93	3	0,21	0,69	Рекомендуемое
0,5	91	6	0,21	0,67	Сильный учёт
0,7	88	11	0,22	0,65	Завышенный учёт
1,0	85	17	0,22	0,62	Игнорир. пропусков

Из табл. 2 видно, что максимальный % Recovery = 93 % при минимальном % False = 3 % достигается при $\phi_0 = 0,3$. При $\phi_0 = 0$ (listwise deletion) % Recovery снижается до 67 % – падение на 26 п.п. При $\phi_0 = 1,0$ число ложных правил резко возрастает до 17 % из-за равномерного «размазывания» неизвестных значений по всем термам (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение стратегий при различных уровнях пропусков (иллюстративные значения)

ρ (%)	Listwise del. Recovery	Импут. ср. Recovery	Функция ϕ ($\phi_0=0,3$) Recovery	Функция ϕ ($\phi_0=0,3$) False
0	100	100	100	0
10	83	91	97	2
20	67	83	93	3
30	50	72	88	5

Табл. 3 показывает, что преимущество функции присутствия нарастает с ростом ρ . При $\rho = 10\%$ разрыв с listwise deletion составляет 14 п.п.; при $\rho = 30\%$ – 38 п.п. Импутирование средним занимает промежуточное положение по % Recovery, но порождает значительно больше ложных правил при высоких ρ (данные не показаны из-за ограничений места).

На основе теоретического анализа и экспериментов предлагаются следующие рекомендации по выбору ϕ_0 . MCAR: $\phi_0 = 0,3$ (значение по умолчанию). MAR: $\phi_0 \in [0,1; 0,2]$, возможен подбор через вложенную CV. MNAR: $\phi_0 \in [0,05; 0,15]$, интерпретировать с осторожностью. При высоком $\rho > 30\%$: уменьшить ϕ_0 на 0,05–0,10 от базового значения. Оптимальное ϕ_0 подбирается через вложенную CV при наличии известных эталонных закономерностей.

В табл. 4 приведено систематическое сравнение стратегий обработки пропусков по ключевым характеристикам применительно к нечёткому ИАД.

Таблица 4

Сравнение стратегий обработки пропущенных значений

Характеристика	Listwise deletion	Импут. средним	Функция присутствия ϕ
Смещение при MCAR	Нет	Нет	Нет
Смещение при MAR	Да	Частично	Снижено
Потеря объектов	Да	Нет	Нет
Искажение дисперсии	Нет	Да	Нет
Порождение ложных правил	Нет	Да	Минимально
Интеграция в алгоритм	Нет	Нет	Да
Вычислит. сложность	Низкая	Средняя	Низкая
Теор. обоснование	Нет	Нет	Да (теоремы 1–4)
Параметры настройки	0	0	1 (ϕ_0)

Функция присутствия является единственным из трёх подходов, который: интегрирован непосредственно в механизм вычисления нечётких закономерностей; не теряет объектов; не искажает дисперсию атрибутов; имеет строгое теоретическое обоснование. Единственный недостаток – один настраиваемый параметр ϕ_0 , который имеет интуитивно понятный смысл и устойчиво оптимален при $\phi_0 = 0,3$ для MCAR-данных.

Иллюстративный пример 1: нечёткий поиск ассоциативных правил при пропусках. Рассмотрена FIS с тремя атрибутами: Возраст (числовой, [18, 80]), Доход (числовой, [0, 200] тыс. руб., 20 % пропусков), Риск (категориальный, {ВЫСОКИЙ, НИЗКИЙ}). Нечёткие разбиения по QNT: Возраст $\rightarrow$ {МОЛОДОЙ, СРЕДНИЙ, ПОЖИЛОЙ}; Доход $\rightarrow$ {НИЗКИЙ, СРЕДНИЙ, ВЫСОКИЙ}. Параметры: $\phi_0 = 0,3$; $\sigma_{\min} = 0,10$; $\rho_{\min} = 0,70$; $k_a = 3$ для числовых атрибутов.

Для объекта u_1 с Возраст = 29, Доход = * (пропущено): $\mu_{\text{МОЛ}}(29) = 0,85$; $\mu_{\text{СР}}(29) = 0,15$. Вклад по Доходу: $\tau_{\{\text{Доход},*\}}(u_1) = 0,3 \cdot (1/3) \cdot 1 = 0,10$. Степень выполнения набора $I = \{\text{Возраст-МОЛ}, \text{Доход-НИЗ}\}$: $\tau_I(u_1) = T_{\min}(0,85, 0,10) = 0,10$. Объект участвует в анализе с пониженным вкладом, но не исключается.

Для объекта u_2 с Возраст = 31, Доход = 18 тыс. руб. (известно): $\mu_{\text{МОЛ}}(31) = 0,75$; $\mu_{\text{НИЗ}}(18) = 0,82$. Степень выполнения I : $\tau_I(u_2) = T_{\min}(0,75, 0,82) = 0,75$.

При listwise deletion объект u_1 был бы исключён полностью. При 20 % пропусков по Доходу из 500 объектов исключаются 100 объектов – 20 % выборки. Это снижает f_{supp} правила «МОЛОДОЙ $\wedge$ НИЗКИЙ $\rightarrow$ ВЫСОКИЙ» с 0,21 до 0,17, что может вывести правило за порог $\sigma_{\min} = 0,15$.

Иллюстративный пример 2: медицинская диагностика. В задаче диагностики ишемической болезни сердца (ИБС) (Heart Disease, UCI ML, $n = 303$, $\rho \approx 0,7$ %) функция присутствия при $\phi_0 = 0,3$ позволяет сохранить 2 объекта с пропущенным значением атрибута «число сосудов с кальцинозом» (ca). Это незначительно при общем объёме, однако именно редкие объекты с высоким значением $ca = 3$ являются ключевыми для правил диагностики тяжёлой степени ИБС. При listwise deletion эти объекты теряются, снижая поддержку соответствующих правил.

Иллюстративный пример 3: промышленная диагностика с периодическими отказами датчиков. В задаче диагностики оборудования уровень пропусков $\rho \approx 8\text{--}15$ % (периодические сбои датчиков температуры, механизм MCAR). При $\phi_0 = 0,3$ объекты с пропущенными показаниями температуры участвуют в анализе с пониженным вкладом. Это позволяет обнаруживать правила вида «ЕСЛИ Вибрация – ВЫСОКАЯ $\wedge$ Ток – ВЫСОКИЙ ТО Состояние – ПРЕДОТКАЗНОЕ» даже для объектов с пропущенной температурой, поскольку вклад по атрибуту Температура взвешивается на $\phi_0 = 0,3$, не обнуляясь полностью.

Заключение

В работе предложена и теоретически обоснована функция присутствия $\varphi: U \times A \rightarrow [0, 1]$ как механизм корректной обработки пропущенных значений в нечётком интеллектуальном анализе данных. Основные результаты:

1. Введено формальное определение нечётко заданной информационной системы FIS с функцией присутствия (Определения 1–5). Доказана корректность FIS: $\text{fsupp}(I) \in [0, 1]$ (Теорема 1).

2. Доказана антимонотонность нечёткой поддержки для произвольной t-нормы (Теорема 2) со Следствием 1 о теоретическом основании сокращения пространства поиска.

3. Доказана устойчивость к атрибутивному шуму через константу Липшица ФП (Лемма 1), инвариантность к монотонным преобразованиям (Утверждение 1), ограниченность влияния выбросов (Теорема 4).

4. Доказана теорема о предельных случаях φ_0 (Теорема 3), формально связывающая предложенный подход с listwise deletion и импутированием.

5. Предложены три стратегии нечётких разбиений UNI, QNT, OPT и сформулированы рекомендации по их выбору (табл. 1).

6. Проведён детальный анализ влияния φ_0 на качество закономерностей (табл. 2, 3); рекомендованы оптимальные значения φ_0 в зависимости от механизма пропусков.

7. Систематическое сравнение стратегий (табл. 4) показало, что функция присутствия является единственным подходом, объединяющим отсутствие потерь объектов, минимальное искажение данных и строгое теоретическое обоснование.

Перспективами дальнейших исследований являются: обобщение на механизмы MAR и MNAR с явным учётом ковариационной структуры пропусков; разработка адаптивной функции присутствия $\varphi(u, a, I)$, зависящей от состава набора I ; применение функции присутствия в нейро-нечётких гибридных системах.

Список источников

1. Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. From data mining to knowledge discovery in databases // *AI Magazine*. 1996. Vol. 17. № 3. P. 37–54.
2. Hong T.-P., Kuo C.-S., Chi S.-C. Mining association rules from quantitative data // *Intelligent Data Analysis*. 1999. Vol. 3. № 5. P. 363–376.
3. Fuzzy association rules: general model and applications / M. Delgado [et al.] // *IEEE TFS*. 2003. Vol. 11. № 2. P. 214–225.
4. Selecting fuzzy if-then rules for classification problems using genetic algorithms / H. Ishibuchi [et al.] // *IEEE TFS*. 1995. Vol. 3. № 3. P. 260–270.
5. Bezdek J.C. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. New York: Plenum, 1981. 256 p.
6. Little R.J.A., Rubin D.B. *Statistical Analysis with Missing Data*. 2nd ed. New York: Wiley, 2002. 408 p.
7. Saar-Tsechansky M., Provost F. Handling missing values when applying classification models // *JMLR*. 2007. Vol. 8. P. 1623–1657.
8. Buuren S.V. *Flexible Imputation of Missing Data*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 415 p.
9. Pattern classification with missing data: a review / P.J. García-Laencina [et al.] // *Neural Computing & Applications*. 2010. Vol. 19. № 2. P. 263–282.
10. Хань Дж., Камбер М., Пей Дж. *Методы интеллектуального анализа данных*. М.: Morgan Kaufmann, 2011.
11. Agrawal R., Srikant R. Fast algorithms for mining association rules // *Proc. VLDB* 1994. P. 487–499.
12. Salieb-Aouissi A., Vrain C., Nortet C. QuantMiner: A genetic algorithm for mining quantitative association rules // *Proc. IJCAI-07*. P. 1035–1040.

13. Genetic Fuzzy Systems / O. Cordon [et al.]. Singapore: World Scientific, 2001. 488 p.
14. Dubois D., Prade H. Possibility Theory. New York: Plenum Press, 1988. 263 p.
15. Pedrycz W., Gomide F. An Introduction to Fuzzy Sets. Cambridge: MIT Press, 1998. 465 p.
16. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 574 p.
17. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353.
18. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 4th ed. Boston: Kluwer, 2001. 514 p.
19. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proc. IEEE ICNN 1995. P. 1942–1948.
20. Штовба С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 288 с.

References

1. Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. From data mining to knowledge discovery in databases // AI Magazine. 1996. Vol. 17. № 3. P. 37–54.
2. Hong T.-P., Kuo C.-S., Chi S.-C. Mining association rules from quantitative data // Intelligent Data Analysis. 1999. Vol. 3. № 5. P. 363–376.
3. Fuzzy association rules: general model and applications / M. Delgado [et al.] // IEEE TFS. 2003. Vol. 11. № 2. P. 214–225.
4. Selecting fuzzy if-then rules for classification problems using genetic algorithms / H. Ishibuchi [et al.] // IEEE TFS. 1995. Vol. 3. № 3. P. 260–270.
5. Bezdek J.C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. New York: Plenum, 1981. 256 p.
6. Little R.J.A., Rubin D.B. Statistical Analysis with Missing Data. 2nd ed. New York: Wiley, 2002. 408 p.
7. Saar-Tsechansky M., Provost F. Handling missing values when applying classification models // JMLR. 2007. Vol. 8. P. 1623–1657.
8. Buuren S.V. Flexible Imputation of Missing Data. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 415 p.
9. Pattern classification with missing data: a review / P.J. García-Laencina [et al.] // Neural Computing & Applications. 2010. Vol. 19. № 2. P. 263–282.
10. Han' Dzh., Kamber M., Pej Dzh. Metody intellektual'nogo analiza dannyh. M.: Morgan Kaufmann, 2011.
11. Agrawal R., Srikant R. Fast algorithms for mining association rules // Proc. VLDB 1994. P. 487–499.
12. Salleb-Aouissi A., Vrain C., Nortet C. QuantMiner: A genetic algorithm for mining quantitative association rules // Proc. IJCAI-07. P. 1035–1040.
13. Genetic Fuzzy Systems / O. Cordon [et al.]. Singapore: World Scientific, 2001. 488 p.
14. Dubois D., Prade H. Possibility Theory. New York: Plenum Press, 1988. 263 p.
15. Pedrycz W., Gomide F. An Introduction to Fuzzy Sets. Cambridge: MIT Press, 1998. 465 p.
16. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 574 p.
17. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353.
18. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 4th ed. Boston: Kluwer, 2001. 514 p.
19. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proc. IEEE ICNN 1995. P. 1942–1948.
20. Shtovba S.D. Proektirovanie nechyotkih sistem sredstvami MATLAB. M.: Goryachaya liniya–Telekom, 2007. 288 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.05.2026; одобрена после рецензирования: 29.06.2026;
принята к публикации: 30.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 25.05.2026; approved after review: 29.06.2026;
accepted for publication: 30.06.2026

Информация об авторах:

Максимова Елена Александровна, профессор кафедры «Безопасность телекоммуникаций» Московского технического университета связи и информатики (123112, Москва, Пресненская наб., д. 10, стр. 2), доктор технических наук, доцент, e-mail: maksimova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8788-4256>, SPIN-код: 6876-5558

Утешева Гульнара Шаукатовна, заведующая кафедрой энергетики, автоматизации и вычислительной техники Западно-Казахстанского инновационного-технологического университета (090000, Казахстан, г. Уральск, ул. Январцевская, д. 5), <https://orcid.org/0000-0003-2253-7493>

Громов Юрий Юрьевич, профессор Тамбовского государственного технического университета (392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5), доктор технических наук, профессор, e-mail: gromovtambov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-2731>, SPIN-код: 2852-2633

Карасев Павел Игоревич, доцент кафедры КБ-1 «Защита информации» Института кибербезопасности и цифровых технологий МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78), кандидат технических наук, e-mail: karasevpav@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3628-6980>, SPIN-код: 5033-6943

Стародубов Константин Владимирович, доцент кафедры информационной безопасности киберфизических систем НИУ ВШЭ (101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 20), кандидат технических наук, e-mail: skw@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6977-9285>, SPIN-код: 1671-5907

Information about authors:

Maksimova Elena A., professor of the department of telecommunications security of the Moscow technical university of communications and informatics (123112, Moscow, Presnenskaya emb., 10, p. 2), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: maksimova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8788-4256>, SPIN: 6876-5558

Utesheva Gulnara Sh., head of the department of energy, automation and computer engineering of the West Kazakhstan university of innovation and technology (090000, Kazakhstan, Uralsk, Januartsevskaya st., 5), <https://orcid.org/0000-0003-2253-7493>

Gromov Yuri Yu., professor of the Tambov state technical university (392000, Tambov, Sovetskaya st., 106/5), doctor of technical sciences, professor, e-mail: gromovtambov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-2731>, SPIN: 2852-2633

Karasev Pavel I., associate professor of the KB-1 information security department at the Institute of cybersecurity and digital technologies of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), candidate of technical sciences, e-mail: karasevpav@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3628-6980>, SPIN: 5033-6943

Starodubov Konstantin V., associate professor of the department of information security of cyberphysical systems of the National research university higher school of economics (101000, Moscow, Myasnitskaya st., 20), candidate of technical sciences, e-mail: skw@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6977-9285>, SPIN: 1671-5907

Научная статья

УДК 004.42; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-104-110

**СПОСОБЫ РАСЧЕТА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЪЕМА
ФОРМ-СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРОГРАММЫ**

✉ Израилов Константин Евгеньевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ konstantin.izrailov@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению свойств программы на различных этапах разработки, определяемых авторской форм-содержательной концепцией ее представлений. Суть данной концепции заключается в том, что программа рассматривается через дихотомию ее формы как внешнего описания на заданном языке или нотации и содержания, определяющего внутреннюю логику или функциональность; при этом, по мере разработки содержание остается инвариантным, а форма эволюционирует от человеко-ориентированной к машинно-ориентированной. Выделены и описаны следующие представления: идея, концептуальная модель, архитектура, алгоритмы, исходный код, дерево абстрактного синтаксиса, ассемблерный код, машинный код. В качестве измеряемого свойства программы рассматривается информационный объем представления, соответствующий размеру формы, используемой при описании программы. Для каждого из представлений приведен способ расчета такого объема, а также его формализованная запись. Указаны основные пути уточнения способов расчета объема и дальнейшего развития исследования.

Ключевые слова: программа, характеристики, форма, содержание, информационный объем, способ расчета

Для цитирования: Израилов К.Е. Способы расчета информационного объема форм-содержательных представлений программы // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 104–110. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-104-110

Scientific article

**METHODS FOR CALCULATING THE INFORMATION VOLUME
OF FORM-CONTENT PRESENTATIONS OF THE PROGRAM**

✉ Izrailov Konstantin E.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ konstantin.izrailov@mail.ru

Abstract. This paper examines the properties of a program at various stages of development, as defined by the author's form-content concept of its representations. The concept centers on viewing a program through the dichotomy of its form, as an external description in a given language or notation, and its content, which defines its internal logic or functionality. While the content remains invariant during development, it evolves from human-oriented to machine-oriented in form. The following representations are identified and described: idea, conceptual model, architecture, algorithms, source code, abstract syntax tree, assembler code, and machine code. The measurable property of a program is the information volume of a representation, corresponding to the size of the form used to describe the program. A method for calculating such volume and a formalized notation are provided for each representation. The main ways to refine the methods for calculating the volume are indicated, and avenues for further research development are offered.

Keywords: program, characteristics, form, content, information volume, calculation method

For citation: Izrailov K.E. Methods for calculating the information volume of form-content presentations of the program // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 104–110. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-104-110

Введение

Информационные технологии являются неотъемлемой частью современного мира, в основе их лежит программное обеспечение [1]. Однако, хотя практическое создание выполняемых программ и имеет достаточно долгую историю, их теоретические свойства изучены еще недостаточно. Ранее автором была предложена форм-содержательная концепция представлений, через которые проходит любая программа (по крайней мере, в случае применения императивной, процедурной, объектно-ориентированной и других классических парадигм программирования). В рамках концепции любое представление программы (например, исходный код) может быть рассмотрено как его дихотомия на внешний вид – то есть форму, и внутреннюю логику – то есть содержание [2], что было обосновано экспериментально и формализовано [3]. Без внесения уязвимостей в процессе разработки программы ее содержание остается неизменным (изначальная функциональность тождественна конечной выполняемой), а форма преобразуется от человеко-ориентированной к машинно-ориентированной. При этом внешний вид программы постепенно «разрастается», поскольку первые представления ориентированы на восприятие человеком, оперирующим небольшим количеством емких конструкций, а последние предназначены для выполнения на некотором процессоре, поддерживающем разнообразный набор инструкций и их операндов. Как результат, поиск заложенных в высокоуровневых представлениях уязвимостей [4] по низкоуровневым оказывается неэффективным из-за их недостаточной локализации в коде. Тем не менее остается нерассмотренным теоретико-практический вопрос оценки формы программы [5] в каждом из представлений – его информационного объема, что является задачей текущего исследования и в интересах решения которой далее будут предложены соответствующие способы расчета.

Представления программы

Ранее был выделен ряд представлений, графовидная схема перехода между которыми позволяет задавать жизненный цикл создаваемой программы. Далее будет рассмотрена наиболее распространенная ветка такого графа, соответствующая классическому пути большинства программ – от задумки до выполняемого образа. Краткое описание представлений такого пути с указанием их назначений, особенностей форм и используемых базисных элементов приведено далее.

Идея является самым первым представлением программы, поскольку закладывает ее требуемую функциональность – то, что программа должна делать в конечном итоге. Вид представления является максимально неформализованным, поскольку предназначен для работы с ним человека. В качестве базисных конструкций представления могут считаться слова и предложения естественного языка.

Концептуальная модель осуществляет базовую формализацию идеи путем выделения основных элементов функциональности программы и их взаимосвязей [6]. Модель задает основную цель, на достижение которой направлена вся разработка. Базисными конструкциями представления являются текстовые описания блоков основных сущностей предметной области и их связей.

Архитектура программы считается первым представлением, имеющим непосредственное отношение к программному коду, поскольку выделяет иерархию логических модулей (компонентов). Каждый из них может интерпретироваться как одна из частных целей, достигаемых программой в процессе функционирования. Таким образом, с точки зрения базисных элементов, модули в представлении имеют более формализованную запись и строгие взаимосвязи, чем в случае концептуальной модели.

Алгоритмы программы являются составными частями архитектурных модулей и предназначены для выполнения отдельных задач, совокупность которых приводит к достижению частных целей [7]. Классически алгоритмы являются совокупностью названия, входных и выходных параметров, а также внутренней логики. Базисные элементы состоят из блоков алгоритмов, таких как вычисление, условие, цикл, вызов, которые связаны логикой выполнения.

Исходный код предназначен для непосредственного кодирования программы на специализированном языке программирования. Такая запись, хотя все еще ориентирована на понимание разработчиком, однако уже более учитывает необходимость выполнения на процессоре. Базисные элементы зависят от конкретного языка, а точнее, используемых в нем минимальных единиц синтаксиса – токенов.

Дерево абстрактного синтаксиса является служебным представлением, которое строится по программе в процессе ее компиляции соответствующими средствами [8]. Назначением дерева является отвязка программы от специфики языка программирования путем записи операций в унифицированной форме. Базисными элементами представления являются узлы такого графа.

Ассемблерный код может считаться первым представлением, ориентированным именно на выполнение, а не разработку, поскольку он состоит из последовательности текстовых строк с формализованным описанием процессорных инструкций и их операндов. Соответственно, базисные элементы представления определяются токенами нотации такой ассемблерной записи.

Машинный код подходит для непосредственного выполнения на процессоре, поскольку содержит бинарную запись процессорных инструкций (то есть тех, которые имели текстовую запись в ассемблерном коде) [9]. Базисными элементами являются компактно заданные (за счет бинарной записи) инструкции, включающие в себя как саму выполняемую операцию, так и ее операнды.

Способы расчета

Исходя из приведенного описания представлений программы, их можно считать достаточно разнородными как с точки зрения назначения и формы, так и используемых базисных элементов. Таким образом, для каждого из представлений можно предположить собственный способ расчета его информационного объема (естественно, с позиции формы), что и приводится далее.

Идея, как представление программы, имеет наименее формализованный вид. Однако, если ее рассматривать как некоторое текстовое описание на естественном языке, то объем представления может быть рассчитан по количеству соответствующих слов и знаков (которые также играют смысловую роль):

$$\begin{cases} Idea \equiv (IdeaElement_i) \\ Volume_{Idea}() := |\{IdeaElement_i\}|' \end{cases}$$

где *Idea* – представление идеи программы; (...) – здесь и далее – последовательность элементов, в отличие от (), являющегося постфиксом для указания на способ вычисления (как некоторую функцию); *IdeaElement_i* – элемент описания на естественном языке; *Volume_{Idea}()* – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно использовать лингвистические метрики текста, семантическую сложность его элементов, а также оценивать читаемость и формализацию.

Объем представления *концептуальной модели* программы может быть вычислен по количеству ее функциональных элементов, а также их связей, несущих определенную содержательную нагрузку:

$$\begin{cases} ConceptModel \equiv \langle \{ConceptElement_i\} \{ConceptLink_j\} \rangle \\ Volume_{ConceptModel}() := |\{ConceptElement_i\}| + |\{ConceptLink_j\}| \end{cases}'$$

где *ConceptModel* – представление концептуальной модели программы; *ConceptElement_i* и *ConceptLink_j* – *i*-ый элемент и их *j*-ая связь в концептуальной модели; *Volume_{ConceptModel}()* – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно ввести типизацию связей, уровни иерархий элементов (при наличии) и оценивать структурированность.

Объем представления *архитектуры* программы может быть вычислен по количеству ее модулей – как дочерних, так и иерархически их включающих:

$$\begin{cases} Architecture \equiv \langle \{ArchModule_i\}, \{ArchLink_j\} \rangle \\ Volume_{Architecture}() := |\{ArchModule_i\}| \end{cases}'$$

где *Architecture* – представление архитектуры программы; *ArchModule_i* и *ArchLink_j* – *i*-ый модуль и их *j*-ая связь в архитектуре; *Volume_{Architecture}()* – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно учитывать типы модулей и связей, их роли, оценивать сложность иерархии, применять метрики связности и целостности, понятность описания внутри блоков.

Типичной формой записи *алгоритмов* является их блок-схема [10], представляющая собой граф потока управления для каждой подпрограммы, в узлах которого расположены операции, часто содержащие человеко-ориентированное описание. Таким образом, объем представления может быть рассчитан по количеству таких узлов:

$$\begin{cases} Algorithms \equiv \{Algorithm_i\} \\ Algorithm_i \equiv \langle AlgBlock_{i,j}, AlgLink_{i,k} \rangle, \\ Volume_{Algorithms}() := |\{AlgBlock_{i,j}\}| \end{cases}$$

где *Algorithms* – представление алгоритмов программы; *Algorithm_i* – алгоритм *i*-ой подпрограммы; *AlgBlock_{i,j}* и *AlgLink_{i,k}* – *j*-ый модуль и их *k*-ая связь в алгоритме *i*-ой подпрограммы; *Volume_{Algorithms}()* – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно учитывать типы блоков с весовой оценкой их сложности, оценивать цикломатическую сложность и степень вложенности условных ветвлений, а также размеры блоков и сложность их описания.

Каждый из алгоритмов имеет текстовую запись на соответствующем языке программирования, что позволяет рассчитать объем представления *исходного кода* по количеству используемых для записи токенов. При этом токены, относящиеся к «синтаксическому сахару» и не влияющие на содержание программы (то есть логику ее работы), могут быть опущены:

$$\begin{cases} SourceCode \equiv (SrcToken_i) \\ SrcToken_i \in SrcTokens_{Content} \\ Volume_{SourceCode}() := |\{SrcToken_i\}| \end{cases},$$

где $SourceCode$ – представление исходного кода программы; $SrcToken_i$ – i -ый токен текста; $SrcTokens_{Content}$ – множество всех токенов кода, имеющих смысловую нагрузку; $Volume_{SourceCode}()$ – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно учитывать типизацию токенов, использовать классические метрики программного обеспечения, добавить учет синтаксических конструкций.

Объем представления *дерева абстрактного синтаксиса* может быть рассчитан по количеству его узлов, содержащих, по сути, типы операций, операнды, переменные, константы и пр. При этом все подпрограммы могут быть заданы в рамках единого дерева:

$$\left\{ \begin{array}{l} AbstractSyntaxTree \equiv \{\{AstNode_i\}, \{AstLink_j\}\} \\ Volume_{AbstractSyntaxTree}() := |\{AstNode_i\}| \end{array} \right\},$$

где $AbstractSyntaxTree$ – представление дерева абстрактного синтаксиса программы; $AstNode_i$ и $AstLink_j$ – i -ый узел и их j -ая связь в дереве; $Volume_{AbstractSyntaxTree}()$ – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно учитывать типы узлов и их семантику, глубину дерева и его поддеревьев, оценивать подобие узлов и расстояние между ними.

Поскольку *ассемблерный код* представляет собой список строк для всех подпрограмм, каждая из которых содержит текстовое описание одной процессорной инструкции (кроме служебной и пр. информации), то его объем можно рассчитать по количеству токенов текста без учета синтаксического сахара (аналогично представлению исходного кода):

$$\left\{ \begin{array}{l} AssemblerCode \equiv (AsmLine_i) \\ AsmLine_i \equiv (AsmLineToken_{i,j}) \\ AsmLineToken_{i,j} \in AsmTokens_{Content} \\ Volume_{AssemblerCode}() := |\{AsmLineToken_{i,j}\}| \end{array} \right\},$$

где $AssemblerCode$ – представление ассемблерного кода программы; $AsmLine_i$ – i -ая строка текста кода; $AsmLineToken_{i,j}$ – j -ый токен в i -ой ассемблерной строке; $AsmTokens_{Content}$ – множество всех ассемблерных токенов, имеющих смысловую нагрузку; $Volume_{AssemblerCode}()$ – способ вычисления информационного объема для представления.

Для уточнения способа расчета можно различать типы токенов (аналогично исходному коду), наличие излишнего синтаксического сахара, веса сложности используемых конструкций.

Объем *машинного кода* можно вычислить путем суммирования количества машинных инструкций, в которых содержатся все подпрограммы:

$$\left\{ \begin{array}{l} MachineCode \equiv (MachineInstr_i) \\ Volume_{MachineCode}^{Float}() := |\{MachineInstr_i\}| \end{array} \right\},$$

где $MachineCode$ – представление машинного кода программы; $MachineInstr_i$ – i -ая инструкция; $Volume_{MachineCode}^{Float}()$ – способ вычисления информационного объема для представления (при процессорных инструкциях переменной длины).

В случае процессорных архитектур с фиксированным размером инструкций достаточно поделить размер машинного кода на длину инструкции (например, в байтах):

$$Volume_{MachineCode}^{Fixed}() := \frac{MachineCodeSize}{MachineInstrLength},$$

где $Volume_{MachineCode^{Float}}()$ – способ вычисления информационного объема для представления (при процессорных инструкциях фиксированной длины); $MachineCodeSize$ – размер машинного кода; $MachineInstrLength$ – длина процессорной инструкции.

Для уточнения способа расчета можно учитывать длину инструкций (в случае их переменной длины), а также применять подобные ассемблерному коду метрики.

Приведенные способы расчета носят приблизительный характер и предназначены для определения общего направления по созданию соответствующего измерительного инструментария. Так, например, явно не учитываются константные значения в представлениях исходного, ассемблерного и машинного кода. Тем не менее, для базовой оценки информационного объема все приведенные способы и их формулы являются достаточно адекватными.

Заключение

В работе решается задача вычисления информационного объема программы на всех этапах разработки в соответствии с авторской форм-содержательной концепцией ее представлений. Основной результат проведенного исследования состоит в оригинальных способах расчета объема, что обладает новизной. Теоретическая значимость состоит в формализованной записи способов расчета на основе показателей представлений, а практическая – в возможности оценить степень изменения информационного объема реальных программ в процессе их инжиниринга, а также внедренных в них уязвимостей. Продолжением исследования должно стать уточнение ряда способов расчета и их применения для реальных программ.

Список источников

1. Цифровые технологии и проблемы информационной безопасности: монография / Т.И. Абдуллин [и др.]. СПб.: СПГЭУ 2021. 163 с.
2. Израилов К.Е. Моделирование программы с уязвимостями с позиции эволюции ее представлений. Часть 1. Схема жизненного цикла // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 75–93. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-1-75-93
3. Израилов К.Е. Моделирование программы с уязвимостями с позиции эволюции ее представлений. Часть 2. Аналитическая модель и эксперимент // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 95–111. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-2-95-111
4. Архитектурные уязвимости моделей телекоммуникационных сетей / М.В. Буйневич [и др.] // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2015. № 4. С. 86–93.
5. Израилов К.Е. Рассмотрение представлений кода программ с позиций метаданных // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Всерос. науч.-метод. конф. Санкт-Петербург, 2012. С. 176–180.
6. Вялых А.В., Гуляев Д.А. Понятие концептуальной модели программой системы // Концепции и модели устойчивого инновационного развития общества: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург, 2023. С. 17–19.
7. Малясова С.В. Алгоритмизация, программирование и технология программирования // Информатика и образование. 2010. № 2. С. 22–36.
8. Горчаков А.В., Демидова Л.А., Советов П.Н. Автоматизированный анализ текстов программ при помощи представлений на основе цепей Маркова и машин экстремального обучения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 89–103. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-89-103
9. Белеванцев А., Журихин Д., Мельник Д. Компиляция программ для современных архитектур // Труды Института системного программирования РАН. 2009. Т. 16. С. 31–50.
10. Баскакова Е.В., Шевко Н.Р. Способы описания алгоритмов: блок-схемы, псевдокод и их роль в разработке // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика: сб. науч. статей по материалам XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2025. С. 190–195.

References

1. Cifrovye tekhnologii i problemy informacionnoj bezopasnosti: monografiya / T.I. Abdullin [i dr.]. SPb.: SPGEU 2021. 163 s.
2. Izrailov K.E. Modelirovanie programmy s uyazvimostyami s pozicii evolyucii ee predstavlenij. Chast' 1. Skhema zhiznennogo cikla // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2023. T. 9. № 1. S. 75–93. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-1-75-93
3. Izrailov K.E. Modelirovanie programmy s uyazvimostyami s pozicii evolyucii ee predstavlenij. Chast' 2. Analiticheskaya model' i eksperiment // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2023. T. 9. № 2. S. 95–111. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-2-95-111
4. Arhitekturnye uyazvimosti modelej telekommunikacionnyh setej / M.V. Bujnevich [i dr.] // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2015. № 4. S. 86–93.
5. Izrailov K.E. Rassmotrenie predstavlenij koda programm s pozicij metadannyh // Fundamental'nye issledovaniya i innovacii v nacional'nyh issledovatel'skih universitetah: materialy Vseros. nauch.-metod. konf. Sankt-Peterburg, 2012. S. 176–180.
6. Vyalyh A.V., Gulyaev D.A. Ponyatie konceptual'noj modeli programnoj sistemy // Konceptii i modeli ustojchivogo innovacionnogo razvitiya obshchestva: sb. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orenburg, 2023. S. 17–19.
7. Malyasova S.V. Algoritmizaciya, programmirovaniye i tekhnologiya programmirovaniya // Informatika i obrazovanie. 2010. № 2. S. 22–36.
8. Gorchakov A.V., Demidova L.A., Sovetov P.N. Avtomatizirovannyj analiz tekstov programm pri pomoshchi predstavlenij na osnove cepej Markova i mashin ekstremal'nogo obucheniya // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2022. № 82. S. 89–103. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-89-103
9. Belevancev A., Zhurihin D., Mel'nik D. Kompilyaciya programm dlya sovremennyh arhitektur // Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN. 2009. T. 16. S. 31–50.
10. Baskakova E.V., Shevko N.R. Sposoby opisaniya algoritmov: blok-skhemy, psevdokod i ih rol' v razrabotke // Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya sovremennoj nauki: teoriya, metodologiya, praktika: sb. nauch. statej po materialam XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2025. S. 190–195.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.03.2026; одобрена после рецензирования: 20.04.2026; принята к публикации: 21.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.03.2026; approved after review: 20.04.2026; accepted for publication: 21.04.2026

Информация об авторах:

Израилов Константин Евгеньевич, профессор кафедры прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: konstantin.izrailov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9412-5693>

Information about authors:

Izrailov Konstantin E., professor of the department of applied mathematics and information technology security of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: konstantin.izrailov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9412-5693>

Аналитическая статья

УДК 004.89; 004.75; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-111-119

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Саратова Татьяна Евгеньевна;

✉Апухтин Александр Михайлович.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉gtmaleksa@gmail.com

Аннотация. Целью работы является анализ архитектурных компонентов мультиагентных систем на основе больших языковых моделей. Метод исследования – сравнительный анализ архитектур MetaGPT, Generative Agents, AutoGen, OrgAgent, MIRIX и ChatDev по единому набору критериев (организация ролей, память, координация, структурированные результаты, взаимодействие, проверка качества) с последующей интеграцией компонентов в единую систему и опытной проверкой на задачах двух типов в одноагентном и мультиагентном режимах. Установлено, что на рассмотренных задачах мультиагентный режим уступает одноагентному по качеству (оценки 3,0 и 4,5 против 9,0 по десятибалльной шкале). Выявлена архитектурная причина: несоответствие типа задачи набору действий в конфигурации ролей. Обнаружена закономерность: при интеграции трех контуров проверки – детектора отказов, проверки соответствия и контура принятия решений – возникает способность к самодиагностике, не наблюдаемая ни в одной из рассмотренных систем по отдельности. Три контура согласованно определили ненадежность результата и отказались его выдать. Данное свойство отличается от известных подходов к диагностике мультиагентных систем, где анализ выполняется после завершения работы. Результаты могут быть использованы при проектировании мультиагентных систем для задач с высокой ценой ошибки.

Ключевые слова: мультиагентные системы, большие языковые модели, архитектура агентов, память агентов, координация, самодиагностика

Для цитирования: Саратова Т.Е., Апухтин А.М. Анализ архитектурных компонентов мультиагентных систем // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 111–119. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-111-119

Analytical article

ANALYSIS OF ARCHITECTURAL COMPONENTS OF MULTI-AGENT SYSTEMS

Saratova Tatiana E.;

✉Apuhtin Alexander M.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia

✉gtmaleksa@gmail.com

Abstract. The aim of this work is to analyze the architectural components of LLM-based multi-agent systems. The research method involves a comparative analysis of MetaGPT, Generative Agents, AutoGen, OrgAgent, MIRIX, and ChatDev architectures against a uniform set of criteria (role organization, memory, coordination, structured outputs, communication, quality control), followed by integration of the components into a single system and experimental evaluation on two task types in single-agent and multi-agent modes. It is found that on the examined tasks the multi-agent mode underperforms the single-agent baseline in quality (scores of 3,0 and 4,5 versus 9,0 on a ten-point scale). The architectural cause is identified: a mismatch between task type and the preconfigured action chain.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

A pattern is discovered: the integration of three verification loops – a failure detector, a compliance check, and a decision-making loop – produces a self-diagnosis capability not observed in any of the examined systems individually. The three loops jointly identified result unreliability and refused to deliver it. This property differs from known multi-agent systems diagnostic approaches where analysis is performed after task completion. The results may be applied when designing multi-agent systems for tasks where the cost of error is high.

Keywords: multi-agent systems, large language models, agent architecture, agent memory, coordination, self-diagnosis

For citation: Saratova T.E., Apuhtin A.M. Analysis of architectural components of multi-agent systems // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 111–119. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-111-119

Введение

Мультиагентные системы на основе больших языковых моделей активно развиваются с 2023 г. Существующие обзоры систематизируют подходы к построению таких систем: команды LLM-агентов способны совместно разрабатывать программное обеспечение, моделировать социальное поведение и решать многошаговые задачи. Каждая из опубликованных систем вносит самостоятельный архитектурный вклад, однако ни одна не объединяет все описанные элементы: одни реализуют роли и типизированные результаты, но лишены долговременной памяти; другие развивают когнитивную память, но не производят файловых результатов; третьи координируют агентов иерархически, но обходятся без памяти и артефактов. Это порождает вопрос: дает ли сочетание лучших элементов из нескольких систем результат, превосходящий каждую из них?

Отдельную задачу составляет диагностика провалов. Существующие эмпирические исследования выделяют десятки режимов отказа в мультиагентных системах, однако предлагают только описательные классификации без средств обнаружения в ходе работы. Известные подходы к диагностике анализируют протоколы выполнения после завершения работы при участии человека. Вопрос о том, способна ли мультиагентная система распознавать собственные провалы в реальном времени, остается открытым.

Цель настоящей работы – анализ архитектурных компонентов мультиагентных систем (МАС) на основе больших языковых моделей (LLM) и исследование свойств, возникающих при совместной работе. Предложенный подход отличается тем, что каждый компонент взят из конкретной публикации с указанием степени соответствия оригиналу, а проверка выполнена с измерением количественных показателей.

Модели и методы исследования

Мультиагентные системы как направление исследований относятся к работам по распределенному искусственному интеллекту [1] и организационной теории [2]. Обзоры [3, 4] систематизируют современные подходы к разработке МАС на основе больших языковых моделей. С появлением генеративных моделей роли агентов, память и координация реализуются новыми средствами. Ниже рассмотренные системы по архитектурным направлениям, что позволяет сопоставить подходы разных авторов к одной и той же задаче.

Роли и распределение обязанностей формализованы в трех из рассмотренных систем, причем подходы заметно различаются. В работе [5] закодированы этапы конвейера: менеджер продукта формирует техническое задание, архитектор проектирует систему, инженер пишет код и тесты, тестировщик проверяет; каждое действие принимает структурированный вход и порождает структурированный выход, проверяемый по JSON-схеме. В исследовании [6] участвуют в свободной беседе на естественном языке до достижения консенсуса. В работе [7] разнесены по трем уровням: управление

(планирование и назначение), исполнение (генерация и ревью) и соответствие (проверка формата); координация идет сверху вниз с фиксированным лимитом раундов [7]. Остальные системы [5, 6, 8] ролевую структуру либо не формализуют, либо задают текстовыми описаниями без ограничений.

Память агентов наиболее развита в двух работах. В исследовании [8] реализован непрерывный поток воспоминаний с оценкой важности, извлечение по формуле с тремя факторами (давность, важность, релевантность), периодическая рефлексия, обобщающая эпизоды в высокоуровневые суждения, и автономное планирование; ablation подтверждает, что отключение рефлексии снижает качество поведения [8]. В работе [9] память разделена на шесть хранилищ (Core, Episodic, Semantic, Procedural, Resource, Knowledge Vault) с LLM-маршрутизатором, определяющим, к какому хранилищу обращаться; на бенчмарке LOCOMO – 85,4 % [9]. Остальные системы [2, 3, 5] долговременной памятью не располагают.

Способы взаимодействия между агентами представлены двумя подходами. В исследовании [9] предложены четыре паттерна: парный диалог, последовательная цепочка, групповое обсуждение с выбором говорящего и вложенные диалоги; предусмотрены также пользовательские функции ответа, позволяющие обрабатывать случаи без обращения к модели [9]. В работе [8] агенты общаются через свободный диалог и передают знания друг другу (социальная диффузия). В остальных системах [2, 3, 5, 6] взаимодействие либо жестко встроено в конвейер, либо не структурировано, либо не предусмотрено.

Работа со структурированными результатами реализована полноценно только в источнике [5], где каждое действие порождает типизированный выход (техническое задание, UML-диаграмма, код, тесты), а инженер использует результаты тестов для итеративной отладки; ablation показывает прирост 4,2 % на HumanEval от этого цикла [5]. Частично результаты создаются в работе [9] (исполнение кода в изолированной среде) и работе [6] (код как итог беседы). В исследования [7–9] файловые результаты не порождаются.

Координация и иерархия наиболее развиты в работе [7]: трехуровневая архитектура дает на SQuAD 2.0 прирост F1-score на 102,73 % при снижении потребления токенов на 74,52 % для GPT-OSS-120B по сравнению с плоской организацией [7, табл. 1]. В исследовании [9] координация гибкая, но без формальной иерархии. В работах [5, 6] – линейный конвейер. В исследовании [8] координация отсутствует: каждый агент автономен. В источнике [9] координация выходит за рамки работы.

Диагностика провалов изучена в одном исследовании [10]: на материале более 1 600 протоколов выполнения семи MAC с участием шести аннотаторов (согласие $k = 0,88$) предложена таксономия MAST из 14 режимов отказа в трех категориях – проблемы проектирования, рассогласование между агентами, провалы проверки. Средств обнаружения провалов в ходе работы авторы не предлагают; подход носит описательный характер. Близкое по направлению исследование [11] также сосредоточено на классификации причин отказов, не вводя механизмов онлайн-диагностики. Ни одна из остальных систем не содержит встроенного механизма самодиагностики.

Таблица 1

Сравнение архитектурных компонентов рассмотренных MAC

Система	Роли	Память	Разд. пам.	Связь	Результ.	Координ.
MetaGPT [5]	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Частично
ChatDev [6]	Да	Нет	Нет	Частично	Да	Частично
Gen. Agents [8]	Частично	Да	Да	Да	Нет	Нет
AutoGen [9]	Частично	Нет	Нет	Да	Частично	Да
OrgAgent [7]	Да	Нет	Нет	Частично	Нет	Да
MIRIX [9]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет

Как видно из табл. 1, каждая из рассмотренных систем покрывает два-три компонента, но ни одна не охватывает все. Роли и результаты развиты в работах по разработке программного обеспечения [2, 5], память – в работах по моделированию поведения [6, 8], координация – в работе по организационной иерархии [7]. Это и определяет задачу интеграции, описанную далее.

Разработанная система

Для каждого из компонентов были выбраны элементы, показавшие наиболее полную его реализацию. Структурированные результаты с проверкой по JSON-схеме воспроизведены по модели [5] – единственной среди рассмотренных, где ввод и вывод каждого действия строго типизированы; ablation в той же работе показывает прирост 4,2 % от цикла обратной связи [5]. Трехуровневая иерархия построена по схеме [7], где координация разделена на три уровня с фиксированным лимитом раундов; на MuSiQue и SQuAD 2.0 она превосходит плоскую по F1-score [7]. Память воспроизводит подход [9] с шестью отдельными хранилищами, обоснованными когнитивными моделями структуры памяти [9]. Рефлексия и извлечение следуют [8], где предложена формула оценки по трем факторам и обобщение эпизодов; ablation подтверждает падение качества без рефлексии [8]. Способы взаимодействия опираются на [9] с четырьмя паттернами и динамическим выбором говорящего. Для диагностики использована таксономия [10] – единственное среди известных авторам исследование отказов MAC на 1 600+ протоколах выполнения с согласием аннотаторов $k = 0,88$.

Каждый элемент переключается настройкой в конфигурационном файле. Все прогоны записывают полный протокол выполнения в JSONL – каждое обращение к модели, каждое сообщение и каждое действие зафиксированы.

Таблица 2

Компоненты разработанной системы и их источники

Элемент	Откуда	Степень
Действия с типизированными результатами и JSON-схемой	[5]	Совпадает
Цикл исполнения кода: sandbox, ошибка, исправление	[5]	Совпадает
Способы взаимодействия агентов	[9]	Совпадает
Стратегии выбора говорящего	[9]	Добавлена role_priority
Участие человека (утверждение, замечания, отмена)	[9]	Упрощено
Кэш вызовов LLM (SHA-ключ, TTL, обход)	[9]	Совпадает
Трехуровневая иерархия	[7]	Совпадает
Эскалация через общего руководителя	[7]	Совпадает
Контур принятия решений: выпустить / доработать	[7]	Расширен до LLM-цикла
Проверка соответствия: 5 аспектов	[7]	Расширена
Память из 6 частей	[9]	Совпадает
LLM-маршрутизатор памяти	[9]	Совпадает
Рефлексия: эпизоды в обобщения	[8]	Расширена

Элемент	Откуда	Степень
Формула оценки: давность * важность * релевантность	[8]	Совпадает
Передача знаний между агентами с разграничением	[8]	Расширена
Детектор отказов (5 из 14 режимов)	[10]	Расширен
Разграничение доступа по ролям (3 слоя)	[12]	Расширено
Гибридный поиск (dense + BM25 + RRF)	Ориг.	–

При интеграции компонентов приняты осознанные упрощения по сравнению с оригиналами, чтобы покрыть большее количество доменов, с которыми можно работать. Раздельные наборы действий для разных типов задач, предусмотренные в работе [5], заменены единой цепочкой. Пользовательские функции ответа из исследования [9], позволяющие обходиться без вызова модели, не реализованы: каждый шаг проходит через модель. Миграция записей между хранилищами памяти, описанная в работе [9], и автономное планирование агентов из исследования [8] опущены. Совместная генерация кода и тестов из работы [5] упрощена до исполнения только точки входа.

Разработанная система объединяет три контура качества. Сначала проверка по пяти аспектам: корректность ролевых границ, целостность результатов, трассируемость, покрытие требований и качество рассуждений; построена по схеме [7] с двумя дополнительными аспектами. Потом детектор отказов: LLM-классификатор на основе таксономии [10]; в отличие от оригинала, где таксономия описательная, здесь она применяется в ходе работы, анализируя журнал решений и последние результаты. Третий – контур принятия решений, где агент уровня управления оценивает итог и выносит решение «выпустить» или «доработать»; построен по модели [7] и расширен до итеративного LLM-цикла.

Все три контура работают в ходе выполнения задачи и способны отказать в выдаче результата. Этим они отличаются от подходов [13, 14], где анализ выполняется после завершения работы.

Результаты исследования

Проведена серия прогонов с рассуждениями объемом до 4 086 токенов на каждое обращение к модели. Ниже подробно разобраны два характерных случая: задача на генерацию программного кода (REST API на Python для TODO-приложения с тремя конечными точками, хранением в памяти и запуском через python main.py) и аналитическая задача (оценка рисков срыва квартального релиза – 5 разработчиков, 6 недель, 32 задачи в бэклоге, CI без performance-тестов – с выработкой рекомендаций). Эти задачи предъявляют разные требования к архитектуре: первая задействует конвейер создания и проверки кода, вторая – аналитические рассуждения нескольких ролей.

Каждая задача выполнена в одноагентном и мультиагентном режимах. В мультиагентном режиме задействованы четыре роли – технический руководитель, менеджер проекта, разработчик и тестировщик – с иерархией подчинения и разграничением доступа к инструментам. Качество оценено LLM-судьей по шкале от 1 до 10 при температуре 0,5 с трехкратным повторением (стандартное отклонение 0,0). Использована бюджетная модель; LLM-судья не заменяет экспертную оценку.

В табл. 3 приведены сводные показатели. Качество – по шкале от 1 до 10, покрытие – доля выполненных требований, pass@1 – запуск с первой попытки. Контур решений – итог управленческого цикла, проверка – результат по пяти аспектам, отказы – число зафиксированных режимов отказа по таксономии [10].

Таблица 3

Сводные показатели

Показатель	API (один)	API (команда)	Риски (один)	Риски (команда)
Качество (1–10)	9,0	3,0	9,0	4,5
Покрытие требований	1,0	0,5	0,95	0,45
pass@1	1,0	0,0	1,0	0,0
Длительность, с	11	469	30	1162
Число вызовов LLM	2	125	2	97
Контур решений	–	выпустить	–	доработать
Проверка пройдена	–	нет (3 зам.)	–	нет (3 зам.)
Режимов отказа	–	4 из 5	–	5 из 5

На задаче генерации API команда подготовила код на FastAPI и приложила файл зависимостей (requirements.txt). Судья снизил оценку: по условию задачи приложение должно запускаться командой `python main.py`, а код требует установки сторонней библиотеки. Одноагентный режим дал аналогичный код, но без явного списка зависимостей, что не привлекло внимания судьи. Этот случай указывает на особенность методики оценки: более прозрачный результат оценивается строже. Цикл исполнения в sandbox сработал по плану – обнаружена ошибка, инженерный агент её исправил. Проверка по пяти аспектам зафиксировала три замечания, однако они не были переданы в решающий контур. Это выявленный пробел реализации: решение выносилось без информации о замечаниях. Пробел устраним и не связан с архитектурой.

На аналитической задаче набор ролей был рассчитан на генерацию кода. Задача анализа рисков требует другой цепочки: оценки ситуации и выработки рекомендаций. Координатор верно определил тип задачи, однако при построении цепочки действий это поле не учитывается – пробел, устранимый введением отдельных наборов действий, как это сделано в работе [5]. Показательно, что система самостоятельно распознала несоответствие: инженерный агент четырежды отказался генерировать программный результат для непрограммистской задачи, контур принятия решений не подписал итог, а детектор зафиксировал все пять режимов. При наличии архитектурного пробела контуры проверки сработали согласованно и предотвратили выдачу ненадежного результата.

Таблица 4

Показатели мультиагентных прогонов

Показатель	Генерация API	Анализ рисков
Шагов конвейера	8	8
Раундов обсуждения	1	2
Эскалаций	0	1
Раундов контура решений	1	2
Кэш: попадания / промахи	19/106	19/78
Обращений к маршрутизатору [9]	0	0
Зафиксировано режимов отказа	4	5 (все)

Маршрутизатор памяти из работы [9] показал нулевое число обращений: все запросы оказались короче порога обхода (8 токенов). Заявленный в исследовании [9] способ динамического выбора хранилища в данных условиях не активировался. Кэш вызовов дал долю попаданий 15–20 %, сокращая число обращений к модели на повторных циклах.

Несмотря на расхождение в оценках качества, мультиагентный режим продемонстрировал свойство, отсутствующее в одноагентном: способность распознавать собственную неготовность и отказываться от выдачи результата. На аналитической задаче все три контура сработали согласованно: детектор зафиксировал пять из пяти режимов отказа (два серьезных), проверка по пяти аспектам не пройдена с тремя замечаниями, а завершающий контур отказал в выдаче. Одноагентный режим дал ответ с оценкой 9,0, но не содержит никакого средства самооценки – пользователь не знает, насколько ответ надежен. Мультиагентный режим с оценкой 4,5 сам указал на ненадежность. Это свойство не описано ни в одной из рассмотренных работ и не возникает при использовании их элементов порознь.

На рассмотренных задачах с бюджетной моделью мультиагентный режим не оправдал накладных расходов по сравнению с одноагентным. Однако установленная причина носит конфигурационный характер: отсутствие отдельных наборов действий по типам задач привело к тому, что аналитическая задача обрабатывалась конвейером, рассчитанным на код. Разделение, аналогичное реализованному в работе [5], устранил это расхождение.

Часть элементов, взятых из рассмотренных работ, в условиях прогонов не активировалась. Маршрутизатор [9] не получил обращений, хранилище общих знаний осталось пустым. При выполнении отдельных задач (в отличие от непрерывного моделирования [8]) потребность в них не возникает. Для проектов с длительным горизонтом эти элементы могут оказаться востребованы.

Наиболее заметный итог серии прогонов – согласованная работа трех контуров. На аналитической задаче они независимо определили, что результат ненадежен, и не допустили его выдачи. Для задач, где цена ошибки высока, способность системы распознать собственную неготовность может оказаться важнее абсолютного качества ответа.

Заключение

Проведен анализ архитектурных компонентов мультиагентных систем на основе больших языковых моделей; для каждой определены сильные стороны и границы. На основе анализа разработана система из 19 компонентов, каждый из которых воспроизведен по конкретной публикации.

Опытные прогоны выявили конфигурационный пробел: единая цепочка действий не подходит для задач разного типа. Пробел не затрагивает архитектуру и устраним введением отдельных наборов действий, как реализовано в работе [5]. Цикл исполнения кода и кэш вызовов сработали в соответствии с описаниями в источниках.

При совместной работе элементов из разных систем проявилось свойство, не описанное ни в одной из них: три контура проверки независимо и согласованно распознали ненадежность результата и не допустили его выдачи. Одноагентный режим таким свойством не располагает. Дальнейшая работа предполагает введение отдельных наборов действий по типам задач, проверку с более мощными моделями и применение самодиагностики в областях с высокой ценой ошибки.

Список источников

1. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Wiley, 2009. 484 p.
2. Минцберг Г. Структура в кулаке: создание эффективной организации / пер. с англ. СПб.: Питер, 2004. 512 с.
3. Large Language Model based Multi-Agents: A Survey of Progress and Challenges / T. Guo [et al.] // arXiv:2402.01680. 2024.

4. Multi-Agent Collaboration Mechanisms: A Survey of LLMs / K.-T. Tran [et al.] // arXiv:2501.06322. 2025.
5. MetaGPT: Meta Programming for A Multi-Agent Collaborative Framework / S. Hong [et al.] // Proc. ICLR. 2024. arXiv:2308.00352.
6. ChatDev: Communicative Agents for Software Development / C. Qian [et al.] // Proc. ACL. arXiv:2307.07924. 2024.
7. OrgAgent: Organize Your Multi-Agent System like a Company / Wang [et al.] // arXiv:2604.01020. 2026.
8. Generative Agents: Interactive Simulacra of Human Behavior / J.S. Park [et al.] // Proc. ACM UIST. arXiv:2304.03442. 2023.
9. MIRIX: Multi-Agent Memory System for LLM-Based Agents / Wang [et al.] // arXiv:2507.07957. 2025.
10. AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation / Q. Wu [et al.] // arXiv:2308.08155. 2023.
11. Why Do Multi-Agent LLM Systems Fail? / M. Cemri [et al.] // Proc. NeurIPS (Datasets and Benchmarks Track). arXiv:2503.13657. 2025.
12. Role-Based Access Control Models / R. Sandhu [et al.] // IEEE Computer. 1996. Vol. 29. № 2. P. 38–47.
13. Towards Self-Improving Error Diagnosis in Multi-Agent Systems / Zhang [et al.] // arXiv:2604.17658. 2026.
14. DiLLS: Interactive Diagnosis of LLM-based Multi-agent Systems via Layered Summary / R. Sheng [et al.] // Proc. CHI. arXiv:2602.05446. 2026.

References

1. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Wiley, 2009. 484 p.
2. Mincberg G. Struktura v kulake: sozдание effektivnoj organizacii / per. s angl. SPb.: Piter, 2004. 512 s.
3. Large Language Model based Multi-Agents: A Survey of Progress and Challenges / T. Guo [et al.] // arXiv:2402.01680. 2024.
4. Multi-Agent Collaboration Mechanisms: A Survey of LLMs / K.-T. Tran [et al.] // arXiv:2501.06322. 2025.
5. MetaGPT: Meta Programming for A Multi-Agent Collaborative Framework / S. Hong [et al.] // Proc. ICLR. 2024. arXiv:2308.00352.
6. ChatDev: Communicative Agents for Software Development / C. Qian [et al.] // Proc. ACL. arXiv:2307.07924. 2024.
7. OrgAgent: Organize Your Multi-Agent System like a Company / Wang [et al.] // arXiv:2604.01020. 2026.
8. Generative Agents: Interactive Simulacra of Human Behavior / J.S. Park [et al.] // Proc. ACM UIST. arXiv:2304.03442. 2023.
9. MIRIX: Multi-Agent Memory System for LLM-Based Agents / Wang [et al.] // arXiv:2507.07957. 2025.
10. AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation / Q. Wu [et al.] // arXiv:2308.08155. 2023.
11. Why Do Multi-Agent LLM Systems Fail? / M. Cemri [et al.] // Proc. NeurIPS (Datasets and Benchmarks Track). arXiv:2503.13657. 2025.
12. Role-Based Access Control Models / R. Sandhu [et al.] // IEEE Computer. 1996. Vol. 29. № 2. P. 38–47.
13. Towards Self-Improving Error Diagnosis in Multi-Agent Systems / Zhang [et al.] // arXiv:2604.17658. 2026.
14. DiLLS: Interactive Diagnosis of LLM-based Multi-agent Systems via Layered Summary / R. Sheng [et al.] // Proc. CHI. arXiv:2602.05446. 2026.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 26.05.2026; одобрена после рецензирования: 27.06.2026;
принята к публикации: 30.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 26.05.2026; approved after review: 27.06.2026;
accepted for publication: 30.06.2026

Информация об авторах:

Саратова Татьяна Евгеньевна, заведующий кафедрой прикладной математики Института информационных технологий МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: saratova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4810-8734>

Апухтин Александр Михайлович, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: gtmaleksa@gmail.com

Information about authors:

Saratova Tatyana E., head of the department of applied mathematics at the institute of information technologies of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: saratova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4810-8734>

Apuhtin Alexander M., MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: gtmaleksa@gmail.com

Научная статья

УДК 004.42; 004.75; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-120-136

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРАВООХРАНИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Акапьев Виктор Львович;

✉ **Борисенко Александр Васильевич;**

Новикова Екатерина Анатольевна.

Белгородский юридический институт МВД России им. И.Д. Путилина, г. Белгород, Россия

✉ borisenko02.94@mail.ru

Аннотация. Информационно-коммуникационные технологии являются неотъемлемым элементом информационного пространства. В условиях динамики криминализации общества и роста преступлений, совершаемых как против информационных систем, так с использованием информационных инструментов, реализация задач правоохранительных структур практически невозможна без их комплексного использования. В статье актуализируется необходимость исследования структуры современных информационно-коммуникационных технологий и выработки их классификации с точки зрения функционала правоохранительных органов. Предлагаемая система отличается новизной и рассчитана на практическое применение в правоохранительной деятельности. В результате проведенного исследования авторы приходят к выводу, что значительное количество разрозненных автоматизированных информационных систем различного ведомственного подчинения характеризуется низкой эффективностью и невозможностью реализации доктрины формирования единого информационного правоохранительного пространства.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии, информационное пространство, информационная система, цифровизация общества

Для цитирования: Акапьев В.Л., Борисенко А.В., Новикова Е.А. К вопросу о классификации информационно-коммуникационных технологий, используемых в правоохранительной деятельности // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 120–136. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-120-136

Scientific article

ON THE CLASSIFICATION OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES USED IN LAW ENFORCEMENT ACTIVITIES

Akapyev Viktor L.;

✉ **Borisenko Alexander V.;**

Novikova Ekaterina A.

**Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of the Russian Federation
named after I.D. Putilin, Belgorod, Russia**

✉ borisenko02.94@mail.ru

Abstract. Information and communication technologies are an integral element of the information space. The implementation of the tasks of law enforcement agencies is almost impossible without their integrated use in the context of the dynamics of criminalization of society and the growth of crimes committed both against information systems and using information tools. The authors emphasize the need to study the structure of modern information and communication technologies and to develop their classification in terms of the functionality of law enforcement agencies. The authors propose a system that is new and designed for practical use in law enforcement. The authors report that a significant number of disparate automated information systems of various departmental subordination show low efficiency and the impossibility of implementing the information doctrine.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Keywords: information and communication technologies, information space, information system, digitalization of society

For citation: Akopyev V.L., Borisenko A.V., Novikova E.A. On the classification of information and communication technologies used in law enforcement activities // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 120–136. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-120-136

Введение

Современное общество тесно связано с технологиями, которые оказывают значительное влияние на все аспекты его функционирования. Правоохранительная деятельность, как и многие другие отрасли, переживает технологическую революцию, основанную на использовании цифровых информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) [1]. От автоматической расшифровки записей с нательных камер и дронов до анализа криминогенной обстановки с помощью искусственного интеллекта [2] и систем обнаружения выстрелов – информационные технологии меняют подходы к профилактике противоправной деятельности, расследованию преступлений и обеспечению правоохранительных органов эффективной информационной аналитикой [3], что актуализирует необходимость введения единой системы их классификации с целью увеличения производительности информационных систем, специальной техники и автоматизации учетов различного назначения. В противном случае увеличение количества используемых автоматизированных систем не приведет к качественному скачку решения оперативных задач правоохранительных органов [4].

Одной из главных проблем современных правоохранительных органов является необходимость справляться с растущим количеством параллельных задач, требующих больших ресурсов, аналитического потенциала и стратегического расставления приоритетов [5, 6], поэтому цифровизация правоохранительной деятельности на основе использования современных и перспективных ИКТ стала необходимым условием эффективной работы полиции, однако многие структурные подразделения системы МВД России по-прежнему отстают в модернизации, что увеличивает разрыв между требованиями оперативной обстановки и их институциональными возможностями.

Для увеличения эффективности использования ИКТ в деятельности правоохранительных органов необходимо, в первую очередь, осуществить их классификацию на основании четко сформулированных критериев. Решение указанной задачи осложняется наличием значительного количества используемых технологий [7, 8], включающих в свой состав как огромные массивы структурированных данных (учеты) [9], так и специализированную технику для негласного получения информации, и многоуровневой структурой МВД России.

Целью исследования является попытка создания авторской системы классификации ИКТ, применяемых в правоохранительных структурах Российской Федерации.

Методы исследования

Характер рассматриваемых вопросов определил применение комплекса взаимодополняющих методов исследования: теоретических и эмпирических. Теоретические методы: изучение и анализ литературы, ведомственных приказов и нормативно-правовой базы. Эмпирические методы: формально-логический, системный, а также сравнение, анализ и статистические исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из целевого назначения применения этих технологий, которое сводится к информационному обеспечению раскрытия преступлений и розыска лиц, представляющих оперативный интерес [10, 11], можно выделить два основных подхода к классификации

таких средств: по их функциональному назначению (информационные учеты, информационные системы и специальная техника) и по уровню формирования (федеральный, региональный, местный).

Классификация по функциональному назначению представляет собой наиболее распространенный подход, который делит все ИКТ на три большие группы:

- системы для работы с информацией (учеты);
- автоматизированные информационные системы;
- технические средства для получения необходимой разнопрофильной информации (специальная и оперативная техника).

Учеты представляют собой основу информационного обеспечения главного направления работы правоохранительных органов – оперативно-розыскной деятельности (ОРД). Они реализованы в виде научно обоснованной системы регистрации, систематизации и хранения информации об объектах, представляющих оперативный интерес.

В зависимости от назначения учеты делятся на несколько видов:

- оперативно-справочные учеты: содержат краткие описания большого массива объектов. Их основная функция – быстрая проверка установочных данных и местонахождения лица или предмета. Примером является пофамильный и дактилоскопический учет;
- розыскные учеты: содержат более подробную информацию об объекте и предназначены для идентификации личности или предмета по описанию. На такой учет ставятся лица, объявленные в федеральный или местный розыск (скрывшиеся преступники, без вести пропавшие), а также похищенное имущество (оружие, антиквариат, автотранспорт);
- криминалистические (экспертно-криминалистические) учеты: включают данные, пригодные для идентификации (следы рук с мест преступлений, пули, гильзы, поддельные документы, микрообъекты);
- оперативные учеты: ведутся непосредственно оперативными подразделениями (например, в делах оперативного учета) и содержат информацию, собранную в ходе ОРД;
- учеты лиц, совершивших административные правонарушения;
- транспортные и специализированные учеты: «Грузы-ЖД» (хищения грузов на ЖД), «Наркобизнес» (учет в сфере незаконного оборота наркотиков).

Согласно ст. 10 Федерального закона Российской Федерации от 12 августа 1995 г. № 144-ФЗ «Об оперативно-розыскной деятельности» (ФЗ № 144-ФЗ), органы, осуществляющие ОРД, могут создавать и использовать информационные системы для решения поставленных задач, поэтому современные учеты ведутся в автоматизированном режиме. Примерами таких автоматизированных информационных систем (АИС) являются:

- ИБД-Ф (интегрированный банк данных федерального уровня) – централизованное хранение и обработка разнородной криминальной информации;
- АДИС-МВД (автоматизированная дактилоскопическая информационная система) – хранение и обработка дактилоскопических данных (отпечатков пальцев);
- АИС «Криминал-И» – учет преступлений и правонарушений, совершенных иностранными гражданами и лицами без гражданства или в отношении них. Включает подсистемы «Административная практика», «Преступление», «Розыск» и др.;
- АИС «Антиквариат» – учет похищенных предметов, имеющих историческую, научную или культурную ценность;
- АИС «Сейф» – учет хищений ценностей из металлических хранилищ (сейфов).

Однако использование АИС в деятельности органов внутренних дел (ОВД) не ограничивается автоматизацией учетов. Став неотъемлемой частью работы правоохранительных органов, они используются для решения широкого круга задач: от учета преступлений и ведения дактилоскопических картотек до сложного анализа данных и нормотворческой деятельности [12]. Классифицировать эти системы можно по нескольким основаниям, что позволяет лучше понять их структуру и предназначение.

Наиболее распространенным подходом является классификация по функциональному назначению, который группирует системы в зависимости от конкретных профессиональных задач:

- автоматизированные информационно-поисковые системы (АИПС);
- автоматизированные информационно-справочные системы (АИСС);
- интегрированные ведомственные платформы;
- информационно-статистические системы;
- информационно-аналитические системы;
- системы обеспечения управления и делопроизводства;
- специализированные системы управления;
- экспертные системы;
- системы поддержки принятия решений и др.

АИПС – это класс АИС, предназначенный для сбора, систематизации, хранения и поиска информации по запросам пользователей [13]. В правоохранительной деятельности они составляют основу криминалистических и оперативно-справочных учетов.

В зависимости от того, какая информация ставится на централизованный учет, АИПС делятся на несколько крупных категорий:

- АИПС по учету лиц, которые содержат сведения о гражданах, представляющих оперативный интерес;
- АИПС криминалистических учетов (биологические и антропометрические данные);
- АДИС (автоматизированная дактилоскопическая информационная система);
- АИПС «Портрет» (или «Фоторобот»);
- АИПС «Оружие»;
- АИПС предметов и вещественных доказательств;
- АИПС событий, преступлений и правонарушений;
- АИПС правовой информации (документальные).

В правоохранительной деятельности АИПС обычно работают в двух основных режимах:

- режим централизованных учетов (ИЦ – информационные центры);
- режим оперативного доступа (АРМ – автоматизированное рабочее место).

В первом случае данные стекаются снизу вверх (из районов в регион, из регионов в Главный информационно-аналитический центр (ГИАЦ МВД России), а запросы направляются вверх для проверки по федеральным базам. В режиме оперативного доступа сотрудник через защищенные каналы связи обращается к базам данных в реальном времени.

В настоящее время реализуется доктрина интеграции АИПС в единое информационное пространство:

- ГИАЦ МВД России является головным центром, где сосредоточены федеральные банки данных;
- интеграционные платформы, где используются системы типа «Следствие-Коннект» или ведомственные сервисы, позволяющие АИПС обмениваться данными (например, АИПС «Оружие» автоматически проверяет владельца по автоматизированному банку данных «Регион-М»);
- мобильные АИПС, когда сотрудники ДПС и ППС используют планшеты с доступом к базам данных для мгновенной проверки документов, номеров автомобилей и лиц по розыску.

АИСС – это класс АИС, предназначенных для сбора, систематизации, хранения и предоставления пользователям справочной информации по запросам. В правоохранительной деятельности они обеспечивают оперативный доступ к нормативным документам, ведомственным учетам и специализированным банкам данных, необходимым для выполнения служебных задач.

В качестве ключевого элемента АИСС выступают правовые информационно-справочные системы, которые обеспечивают сотрудников актуальной нормативной базой и правовой информацией (табл. 1).

Таблица 1

Правовые информационно-справочные системы

Название системы	Назначение	Характеристика
СТРАС «Юрист»	Информационно-правовое обеспечение деятельности ОВД	Ведомственная справочно-правовая система, включающая локальные базы правовых актов подразделений МВД России
АИПС «Правовые акты подразделения системы МВД России» (АИПС «ПА-Регион»)	Автоматизация систематизированного учета правовых актов	Составная часть системы СТРАС «Юрист». Предназначена для учета правовых актов подразделений МВД России и доведения их требований до личного состава. Вносятся официальные тексты правовых актов без грифа ограничения доступа, а также реквизиты актов с грифом ограничения доступа
АИПС «Нормативные правовые акты МВД России»	Ведение ведомственной правовой базы	Обеспечивает функционирование базы нормативных правовых актов МВД России
АИПС «Судебная практика защиты интересов органов внутренних дел»	Формирование фонда судебных решений	Содержит судебные решения по искам, предъявленным к МВД России, и иную судебную практику, касающуюся деятельности ОВД
Справочно-правовые системы общего назначения	Универсальный доступ к законодательству	В образовательных учреждениях МВД России используются системы «КонсультантПлюс» и другие коммерческие справочные правовые системы для учебных и научных целей

Современные АИСС функционируют в рамках единой информационной среды (табл. 2).

Таблица 2

Автоматизированные информационно-справочные системы

Платформа	Характеристика	Функции
ИСОД МВД России (Единая система информационно-аналитического обеспечения деятельности МВД России)	Основная платформа, объединяющая все ведомственные информационные ресурсы.	Обеспечивает доступ к сервисам повседневной деятельности, электронному документообороту и специализированным учетам через единый портал
Ведомственный информационно-справочный портал VISP	Компонент ИСОД для унифицированного доступа к структурированным наборам данных, предварительного просмотра входящей корреспонденции и централизованного управления документами	
Платформа	Характеристика	Функции
Сервис обеспечения охраны общественного порядка	Прикладной сервис ИСОД для автоматизации повседневной и оперативно-служебной деятельности	Включает модули «Административная практика», «Участковый» и др.

АИСС в правоохранительной деятельности охватывают широкий спектр задач от обеспечения доступа к правовым нормам до ведения масштабных учетов лиц, транспорта, оружия и культурных ценностей. Их развитие направлено на интеграцию в единую цифровую среду (ИСОД МВД России) для оперативного информационного обмена и повышения эффективности раскрытия преступлений [14–16].

Информационно-статистические системы представляют собой класс АИС, предназначенных для сбора, накопления, обработки, анализа и хранения статистических данных о состоянии преступности, результатах правоохранительной деятельности и других количественных показателях, характеризующих оперативную обстановку [17].

В правоохранительной деятельности эти системы играют ключевую роль в формировании официальной государственной отчетности, анализе криминогенной ситуации, прогнозировании тенденций преступности и обеспечении информационной поддержки управленческих решений.

Основное предназначение данных систем заключается в преобразовании первичных учетных данных в агрегированную статистическую информацию, пригодную для анализа и принятия решений.

Ключевые функции:

- сбор и консолидация данных – получение первичных учетных документов из территориальных органов и подразделений;
- ведение государственной статистической отчетности – формирование официальных форм отчетности о преступности, следственной работе, прокурорском надзоре и т.д.;
- контроль достоверности – обеспечение полноты и достоверности отражаемых сведений, выявление и устранение искажений статистических данных;
- аналитическая обработка – выявление закономерностей, взаимосвязей между количественными показателями, прогнозирование оперативной обстановки;
- информационное обеспечение управления – предоставление руководству объективных данных для оценки деятельности подразделений и планирования мероприятий.

Основные информационно-статистические системы в правоохранительных органах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Информационно-статистические системы

В системе МВД России		
Название системы	Назначение	Особенности
АИС «Статистика-К»	Сбор, обработка и хранение статистической отчетности о кадровом обеспечении органов внутренних дел	Используется Главным управлением по работе с личным составом МВД России. Данные представляются в электронном виде через сервисы Единой системы информационно-аналитического обеспечения деятельности (ИСОД) МВД России
Интегрированные банки данных (ИБД-Р, ИБД-Ф)	Формирование централизованного учета преступлений и лиц, их совершивших, включая статистические сведения о раскрытых и нераскрытых преступлениях	Содержат информацию о тяжких и особо тяжких преступлениях, лицах, их совершивших, организаторах преступных сообществ

В системе МВД России		
Название системы	Назначение	Особенности
Ведомственная статистическая отчетность МВД России	Формирование официальных статистических форм по различным направлениям деятельности (формы № 1, 2 и др.)	Утверждаются приказами МВД России; контроль полноты и достоверности возложен на руководителей подразделений
В органах прокуратуры Российской Федерации		
Название системы	Назначение	Особенности
АРМ «Статистика» (Автоматизированное рабочее место «Статистика Генеральной прокуратуры Российской Федерации»)	Сбор, обработка и формирование статистической отчетности в электронном виде в органах прокуратуры	Обеспечивает подготовку форм статистической отчетности, их передачу и консолидацию на всех уровнях прокурорской системы
АИСС «Статистика-Регион»	Ведение региональных баз данных уголовно-правовой статистики	Содержит документы первичного учета о преступлениях, лицах, их совершивших, потерпевших, причиненном ущербе. Используется для контроля полноты и достоверности статистических данных на региональном уровне
ГАС ПС (Государственная автоматизированная система правовой статистики)	Комплексная система для ведения государственной статистической отчетности в сфере правовой статистики	Используется в работе прокурорских работников для учета и анализа данных о преступности и результатах правоохранительной деятельности

Информационно-статистические системы оперируют следующими категориями данных:

– сведения о преступлениях – количество, виды, тяжесть, способы совершения [18], места совершения (в общественных местах, на транспорте и т.д.), дополнительные характеристики преступлений [19];

– сведения о лицах, совершивших преступления – социальное положение, должностное положение, наличие судимости, факты совершения преступлений ранее, возрастные и иные социально-криминологические характеристики [20];

– сведения о потерпевших – количество, социально-демографические характеристики, причиненный ущерб;

– сведения о материальном ущербе и изъятии ценностей – суммы причиненного ущерба, данные об изъятых деньгах, ценностях и имуществе.

Важной функцией информационно-статистических систем является обеспечение достоверности отражаемых данных [21–23]. Прокуратура Российской Федерации на постоянной основе проводит надзорную деятельность в этой сфере:

– выявляются искажения в документах первичного учета и базах данных (например, АИСС «Статистика-Регион»);

– проверяется правильность отражения сведений о преступлениях, лицах потерпевших, ущербе;

– при выявлении нарушений вносятся корректировки в документы первичного учета и статистическую отчетность, виновные должностные лица привлекаются к ответственности.

Таким образом, информационно-статистические системы в правоохранительной деятельности обеспечивают:

- формирование официальной государственной отчетности о состоянии преступности и результатах работы правоохранительных органов;
- аналитическую поддержку управленческих решений и прогнозирование оперативной обстановки;
- контроль достоверности первичных учетных данных;
- выявление закономерностей и взаимосвязей между количественными показателями для оценки эффективности деятельности и планирования мероприятий по борьбе с преступностью.

Анализ данных о преступности – важнейшая функция правоохранительных органов, в рамках которой аналитики используют данные, статистические методы и картографирование преступности для понимания и прогнозирования преступной деятельности [24, 25]. Такой подход, основанный на данных, помогает правоохранительным органам оценивать меры реагирования и совершенствовать стратегии профилактики.

Только из открытых источников можно выделить целый ряд АИС локального, регионального и федерального уровней, применяемых в ОВД МВД России и других правоохранительных структурах Российской Федерации для решения задач информационной аналитики (табл. 4).

Таблица 4

Информационно-аналитические системы правоохранительных органов

Система	Функционал	Возможности
Автоматизированная система информационного обеспечения «Прокуратура»	Создание на всей территории Российской Федерации единой АИС	Организация АРМ по каждому виду деятельности органов прокуратуры и формирование локальных проблемно-ориентированных баз данных и программно-технических средств для решения определенной логически полной группы задач по каждому направлению деятельности
Автоматизированная информационно-поисковая система (АИПС) «Автопоиск»	Содержит информацию об угнанных, задержанных, похищенных средствах автотранспорта	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
АИПС «Аэропорт»	Предназначена для выявления в аэропортах на основе паспортных данных разыскиваемых преступников и других лиц, представляющих оперативный интерес, а также утраченных паспортов	Обеспечивает обработку информации в реальном масштабе времени и включает в свой состав отдельные модули
АИПС «Криминал-И»	Применяется для учёта правонарушений, совершённых иностранцами и лицами без гражданства	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
АИПС «Опознание»	Обеспечивает выдачу информации о лицах, пропавших без вести, о неопознанных трупах, о неизвестных больших и детях	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию

Система	Функционал	Возможности
АИПС «ФР-Оповещение»	Обеспечивает учет преступников, разыскиваемых по искам предприятий и организаций (госдолжников), или граждан – неплательщиков алиментов, пропавших без вести, отрабатывает запросы на лиц, находящихся в федеральном розыске, а также готовит циркуляры на объявление или прекращение розыска	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
АИПС «Антиквариат»	Выдает сведения об утраченных и выявленных предметах, представляющих историческую, художественную или научную ценность	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
АИПС «Вещь»	Обеспечивает сведениями о похищенных и изъятых номерных вещах, а также документах, ценных бумагах общегосударственного обращения	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
АИПС «Сейф»	Позволяет осуществлять сбор, обработку и выдачу сведений о преступлениях, при совершении которых взламывались металлические хранилища	Обеспечивает отбор и вывод информации по заданному в запросе условию
Автоматизированная информационно-справочная система (АИСС) «Кадры»	Предназначена для автоматизации процесса управления кадровым составом правоохранительных органов	Построена и технологически увязана с документами личного дела сотрудника. Имеет возможность графического представления исходных данных. Работа в интерактивном режиме
АИСС «Сводка»	Обеспечивает сбор и оперативное поступление информации о событиях, происшествиях и преступлениях	Позволяет работать с базой данных, создаваемой по поступающей в органы внутренних дел оперативной информации о происшествиях и преступлениях, осуществлять поиск в базах данных по реквизитам

Указанные системы разрабатывались на рубеже веков с использованием программно-инструментального средства создания баз данных и работы с ними FLINT, что отразилось на крайне недружественном, предъявляющем довольно жесткие требования к базовой подготовке пользователей, частых сбоях и возможном негативном воздействии вредоносного программного обеспечения. Для примера достаточно сослаться на клиентские требования АИПС «Аэропорт»: Windows 32 bit приложением, совместимым с ОС Windows XP + FrameWork 2.0, Windows 7 и выше.

Системы обеспечения управления и делопроизводства – это класс АИС, предназначенных для автоматизации процессов документационного обеспечения управления, организации электронного документооборота, контроля исполнительской дисциплины, а также информационной поддержки повседневной управленческой деятельности в правоохранительных органах.

В современной правоохранительной деятельности эти системы играют ключевую роль в повышении эффективности управления, сокращении времени на обработку документов и обеспечении прозрачности служебной деятельности.

Основой автоматизации управления и делопроизводства в системе МВД России выступает ИСОД МВД России – комплексная платформа, объединяющая все ведомственные информационные ресурсы и обеспечивающая доступ к сервисам повседневной деятельности через единый портал (табл. 5).

Таблица 5

Ключевые сервисы электронного документооборота

Сервис	Назначение	Ключевые функции
Служба электронного документооборота (СЭД)	Автоматизация внутренней переписки и управление жизненным циклом документов	Ускорение циклов утверждения, контроль прохождения документов, управление правами доступа, обеспечение согласованности между электронными и печатными копиями
Сервис электронной почты (СЭП)	Безопасный обмен служебной корреспонденцией	Передача секретных и несекретных сообщений с автоматической регистрацией, предпросмотр вложений, шифрование, полная отслеживаемость
Ведомственный информационно-справочный портал (VISP, ВИСП)	Унифицированный доступ к информационным ресурсам	Предварительный просмотр входящей корреспонденции, централизованное управление документами, доступ к нормативным документам и шаблонам

Эти сервисы обеспечивают бесперебойный оборот внутренней документации и поддерживают полный цикл официальной переписки. Ключевые преимущества включают:

- снижение объема ошибочных отправок;
- улучшение контроля целостности электронного контента;
- мгновенный доступ к документации с возможностью предварительного просмотра;
- единое управление секретными и несекретными документами.

Помимо общеведомственных систем документооборота, в правоохранительных органах функционируют специализированные автоматизированные системы управления, ориентированные на конкретные оперативные задачи (табл. 6).

Таблица 6

Системы управления оперативными службами

Система	Назначение	Функциональные возможности
Система управления нарядами (СУН)	Автоматизация управления силами и средствами патрульно-постовой службы	GPS-мониторинг патрульных автомобилей в реальном времени, отображение на электронной карте, координация действий при введении оперативных планов («Перехват», «Вулкан»)
Система информационной поддержки и оперативного управления	Интеллектуальная поддержка работы дежурных частей	Интеграция голосовой связи, геоинформационной подсистемы, автоматической телефонной станции; автоматическое заполнение карточки вызова; отображение на карте места происшествия и ближайших патрулей

Эти системы позволяют:

- сократить время реагирования на сообщения о происшествиях;
- обеспечить контроль перемещения служебного транспорта;
- хранить архивы переговоров и маршрутов (до 3–4 месяцев);
- повысить безопасность сотрудников (возможность подачи сигнала тревоги с определением геопозиционирования).

Прикладной сервис ИСОД МВД России, предназначенный для автоматизации процессов организации оперативно-служебной деятельности подразделений, обеспечивающих охрану общественного порядка (СООП).

Основные модули СООП:

- «Административная практика» – автоматизация процессов выявления и пресечения административных правонарушений, ведение дел об административных правонарушениях, контроль полноты и достоверности внесения информации;
- «Участковый» – информационная поддержка деятельности участковых уполномоченных полиции, автоматизация учета результатов работы на административном участке.

Использование СООП позволяет осуществлять мониторинг полноты и достоверности вносимой информации и своевременно принимать меры реагирования к устранению нарушений.

Важным компонентом систем обеспечения управления выступают автоматизированные системы, поддерживающие административно-хозяйственную деятельность (табл. 7).

Таблица 7

Системы обеспечения управления

Направление	Системы	Функции
Кадровый учет	АИС «Кадры-ОП», АИС «Статистика-К»	Ведение личных дел сотрудников, учет кадрового состава, формирование статистической отчетности о кадровом обеспечении
Финансово-хозяйственная деятельность	Ведомственный программно-технический комплекс	Автоматизация бухгалтерского учета, материально-техническое обеспечение, автотранспортное обслуживание

Для обеспечения законности принимаемых управленческих решений в правоохранительных органах функционируют специализированные правовые информационные системы (табл. 8).

Таблица 8

Специализированные правовые информационные системы

Система	Назначение
АИПС «Нормативные правовые акты МВД России»	Ведение базы нормативных правовых актов, регламентирующих деятельность органов внутренних дел
АИПС «Судебная практика защиты интересов органов внутренних дел»	Формирование фонда судебных решений по искам, предъявленным к МВД России, обеспечение доступа к актуальной судебной практике

Автоматизированные системы управления обеспечивают действенный контроль за своевременным выполнением поручений руководства. В рамках электронного документооборота реализованы механизмы:

- автоматической регистрации входящих и исходящих документов;
- отслеживания сроков исполнения;
- контроля прохождения документов по инстанциям;
- формирования отчетов об исполнительской дисциплине.

Системы обеспечения управления и делопроизводства в правоохранительной деятельности представляют собой многоуровневый комплекс взаимосвязанных автоматизированных решений:

1. Базовый уровень – общеведомственные сервисы электронного документооборота (СЭД, СЭП, ВИСП в составе ИСОД МВД России), обеспечивающие бесперебойное движение документов и служебной корреспонденции.

2. Оперативный уровень – специализированные системы управления нарядами и дежурными частями (СУН, системы поддержки оперативных служб), ориентированные на сокращение времени реагирования и повышение раскрываемости преступлений.

3. Отраслевой уровень – прикладные сервисы (СООП с модулями «Административная практика» и «Участковый»), автоматизирующие конкретные направления оперативно-служебной деятельности.

4. Обеспечивающий уровень – системы кадрового, финансового учета и правовой информатизации, поддерживающие административно-хозяйственную деятельность и законность принимаемых решений.

Внедрение данных систем позволяет значительно повысить эффективность управленческой деятельности, сократить время обработки документов и улучшить координацию между различными подразделениями правоохранительных органов.

Также используется классификация АИС по территориальному (уровневому) признаку, которая отражает масштаб действия системы и уровень управления, на котором она функционирует (табл. 9).

Таблица 9

Классификация АИС по территориальному признаку

Уровень	Характеристика	Примеры
Федеральный (общегосударственный)	Охватывает всю страну, содержит централизованные банки данных	Федеральный банк криминальной информации (ГИАЦ МВД России)

Уровень	Характеристика	Примеры
Региональный (республиканский, областной)	Действует в пределах субъекта, аккумулирует информацию с мест	Республиканская информационно-аналитическая система (РИАС) МВД по Чувашской Республике, информационные центры региональных УВД
Районный (городской)	Обеспечивает работу низовых звеньев (районных отделов полиции и т.д.)	АРМ сотрудников в районных ОВД, работающие в единой сети

Используется классификация АИС по типу (способу организации) информации. Данный подход делит системы по форме представления данных, с которыми они работают:

- документальные системы;
- фактографические системы.

Таким образом, одна и та же система может быть классифицирована одновременно по нескольким признакам. Например, АИС «Статистика» Генпрокуратуры – это, с одной стороны, аналитическая федеральная система, а с другой – фактографическая, работающая с формализованными показателями отчетности.

Можно констатировать, что основная цель внедрения всех этих систем направлена на повышение эффективности работы правоохранительных органов путем автоматизации сбора, обработки и анализа огромных массивов информации, необходимой для охраны правопорядка и борьбы с преступностью.

Третьей основной группой классификации ИКТ, применяемых в правоохранительной деятельности, является специальная оперативная техника. Ст. 6 ФЗ № 144-ФЗ разрешает использование в ходе оперативно-розыскных мероприятий видео- и аудиозаписи, кино- и фотосъемки, а также других технических средств. Их применение чаще всего носит негласный характер, что позволяет сохранять в тайне сам факт и результаты оперативно-розыскных мероприятий для последующего использования в доказывании.

Основные виды оперативной техники:

- средства связи – координация действий оперативных сотрудников (скрытно носимые радиостанции с возможностью кодирования сигнала);
- средства поиска – обнаружение орудий преступления, тайников, взрывчатых и наркотических веществ, скрывающихся лиц (металлоискатели, тепловизоры, газоанализаторы, щупы);
- средства визуального контроля и наблюдения – негласное наблюдение за объектом в различных условиях (бинокли, приборы ночного видения, эндоскопы, миниатюрные телекамеры);
- средства аудиального контроля – негласный съем звуковой информации (направленные микрофоны, электронные стетоскопы для прослушивания через стены);
- средства фиксации (документирования) – запись полученной информации на материальный носитель (миниатюрные диктофоны, скрытые видеокамеры);
- специальные химические вещества – нанесение меток на предметы (деньги, документы) для их последующего обнаружения (люминесцирующие, красящие, запаховые вещества);
- средства психофизиологического контроля – оценка достоверности информации при опросе (полиграф, стрессовые анализаторы голоса).

Результаты имеют ориентирующее значение.

Заключение

Таким образом, классификация ИКТ в правоохранительных органах представляет собой иерархическую структуру. На верхнем уровне находятся мощные автоматизированные банки данных федерального и регионального значения, которые обеспечивают оперативников справочной и розыскной информацией. На нижнем, «полевом» уровне

используется многообразная специальная техника – от средств связи и наблюдения до химических веществ и полиграфов, позволяющая добывать и фиксировать информацию в режиме реального времени.

Использование значительного количества разрозненных АИС различного ведомственного подчинения характеризуется низкой эффективностью и невозможностью реализации доктрины формирования единого информационного правоохранительного пространства, поэтому безусловной аксиомой настоящего этапа развития правоохранительной деятельности в условиях цифровизации общества является не просто необходимость использования информационных технологий для реализации, в частности, информационно-аналитического обеспечения, как ключевого направления оценки эффективности борьбы с преступностью, но обязательный переход на применение универсальных программных платформ. Поэтому в перспективе необходимо дальнейшее развитие этих систем в рамках единой информационно-аналитической системы МВД России.

Список источников

1. Программные решения для анализа данных в правоохранительной деятельности / В.Л. Акапьев [и др.] // Вестник современных цифровых технологий. 2025. № 25. С. 55–62. EDN AJNTNN.
2. IoT, big data and Ai applications in the law enforcement and legal system: a review / M.S. Kabir [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2023. Vol. 10. № 5. P. 1777–1789.
3. Technological innovations in criminal justice: The role of cybersecurity in crime detection, investigation and prevention / T. Mahmood [et al.] // Journal of Asian Development Studies. 2025. Vol. 14. № 1. P. 1579–1593.
4. Информатика и информационные технологии в профессиональной деятельности: учеб.-метод. пособие В.Л. Акапьев [и др.]. / Белгород: Белгородский юридический институт МВД России имени И.Д. Путилина, 2025. С. 115. EDN MLYMYQ.
5. Колосович О.С. Информационно-коммуникационные технологии в международном сотрудничестве по уголовным делам // Вестник Волгоградской академии МВД России. 2025. № 2 (73). С. 65–71.
6. Faqir R.S.A. Digital criminal investigations in the era of artificial intelligence: a comprehensive overview // International Journal of Cyber Criminology. 2023. Vol. 17. № 2. P. 77–94.
7. The importance of digital technology in extracting electronic evidence: how can digital technology be used at crime scenes? / T. Khashashneh [et al.] // Pakistan Journal of Criminology. 2023. Vol. 15. № 4.
8. Якушев Д.И. Специальные информационные технологии в правоохранительной деятельности: учеб.-метод. пособие. СПб.: СПбУ МВД России, 2024. 48 с.
9. Семенов Е.Ю. Основные проблемы внедрения автоматизированных информационных систем в деятельность органов внутренних дел // Правоохранительная деятельность. 2022. № 1 (57). С. 36–40.
10. Третьяков Г.М. Информационные технологии в структуре способа совершения преступлений, связанных с незаконным оборотом наркотических средств // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Сер. 4: Правоведение. 2021. Т. 11. № 1. С. 96–103. EDN DJWCXX.
11. Залаев Р.Д. Оперативно-розыскная характеристика преступлений, совершаемых с использованием информационно-телекоммуникационных технологий // Аллея науки. 2024. Т. 1. № 3 (90). С. 137–141. EDN BNUZEC.
12. Policing the data: Can data analytics help law enforcement? / J. Partridge [et al.] // Journal of Information Technology Teaching Cases. 2025. Т. 15. № 1. P. 90–94.
13. Data protection and privacy of the internet of healthcare things (IoHTs) / J. Shahid [et al.] // Applied sciences. 2022. Т. 12. № 4. P. 1927.

14. Шхагапсоев З.Л. О назревших процессах изменения подготовки кадров для правоохранительных органов России, связанных с перемещением преступной деятельности в виртуальную сферу // Пробелы в российском законодательстве. 2022. Т. 15. № 2. С. 118–121. EDN YUFZAU.
15. Поздняков А.Н. О частной теории оперативно-розыскной деятельности по борьбе с преступлениями, совершаемыми с использованием информационно-коммуникационных технологий // Труды Академии управления МВД России. 2022. № 3 (63). С. 119–125. DOI: 10.24412/2072-9391-2022-363-119-125 EDN SNOCUU.
16. Artificial intelligence: An advanced evolution in forensic and criminal investigation / S. Yadav [et al.] // Current Forensic Science. 2023. Vol. 1. № 1. P. e190822207706.
17. Using information technology for comprehensive analysis and prediction in forensic evidence / F.K.H. Mihna [et al.] // Mesopotamian journal of Cybersecurity. 2024. Vol. 3. № 1. P. 4–16.
18. Информационно-коммуникационные технологии в механизме преступной деятельности / С.И. Усачев [и др.] // Сибирский юридический вестник. 2024. № 3 (106). С. 110–117. DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.110 EDN CSDDCM.
19. Does information communication technology facilitate or solve crime? Exploring the experience of law enforcement practitioners in three countries / S. Kirby [et al.] // Policing: An International Journal. 2025. Vol. 48. № 5. P. 1069–1082.
20. Identity, crimes, and law enforcement in the metaverse / H.X. Qin [et al.] // Humanities and Social Sciences Communications. 2025. Vol. 12. № 1. P. 1–15.
21. Кудинова А.А. Использование цифровых технологий в раскрытии и расследовании преступлений: современное состояние и перспективы совершенствования // Юстиция. 2023. № 1. С. 112–119. EDN APAEUN.
22. Саркисян Г.Г. Оперативно-аналитические средства деанонимизации пользователей в мессенджерах и сети Интернет: научные подходы к пониманию и содержанию, алгоритм проведения // Труды Академии управления МВД России. 2025. № 2 (74). С. 114–121. DOI: 10.24412/2072-9391-2025-274-114-121 EDN LVPUMS.
23. Data science, artificial intelligence and the third wave of digital era governance / P. Dunleavy [et al.] // Public Policy and Administration. 2025. Vol. 40. № 2. P. 185–214.
24. Digital Forensics Investigation Approaches in Mitigating Cybercrimes: A Review / A.A. Kazaure [et al.] // Journal of Information Science Theory & Practice (JISaP). 2023. Vol. 11. № 4.
25. Effectiveness of Forensic Computer Modeling for Predicting Wartime Crimes / Y. Yelaiev [et al.] // Pakistan Journal of Criminology. 2024. Vol. 16. № 2.

References

1. Programmnye resheniya dlya analiza dannyh v pravoohranitel'noj deyatel'nosti / V.L. Akap'ev [i dr.] // Vestnik sovremennyh cifrovyyh tekhnologij. 2025. № 25. S. 55–62. EDN AJNTNN.
2. IoT, big data and Ai applications in the law enforcement and legal system: a review / M.S. Kabir [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2023. Vol. 10. № 5. P. 1777–1789.
3. Technological innovations in criminal justice: The role of cybersecurity in crime detection, investigation and prevention / T. Mahmood [et al.] // Journal of Asian Development Studies. 2025. Vol. 14. № 1. P. 1579–1593.
4. Informatika i informacionnye tekhnologii v professional'noj deyatel'nosti: ucheb.-metod. posobie V.L. Akap'ev [i dr.]. / Belgorod: Belgorodskij yuridicheskij institut MVD Rossii imeni I.D. Putilina, 2025. С. 115. EDN MLYMYQ.
5. Kolosovich O.S. Informacionno-kommunikacionnye tekhnologii v mezhdunarodnom sotrudnichestve po ugolovnym delam // Vestnik Volgogradskoj akademii MVD Rossii. 2025. № 2 (73). S. 65–71.
6. Faqir R.S.A. Digital criminal investigations in the era of artificial intelligence: a comprehensive overview // International Journal of Cyber Criminology. 2023. Vol. 17. № 2. P. 77–94.

7. The importance of digital technology in extracting electronic evidence: how can digital technology be used at crime scenes? / T. Khashashneh [et al.] // *Pakistan Journal of Criminology*. 2023. Vol. 15. № 4.
8. Yakushev D.I. Special'nye informacionnye tekhnologii v pravoohranitel'noj deyatel'nosti: ucheb.-metod. posobie. SPb.: SPbU MVD Rossii, 2024. 48 s.
9. Semenov E.Yu. Osnovnye problemy vnedreniya avtomatizirovannykh informacionnykh sistem v deyatel'nost' organov vnutrennih del // *Pravoohranitel'naya deyatel'nost'*. 2022. № 1 (57). S. 36–40.
10. Tret'yakov G.M. Informacionnye tekhnologii v strukture sposoba soversheniya prestuplenij, svyazannyh s nezakonnym oborotom narkoticheskikh sredstv // *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly*. Ser. 4: Pravovedenie. 2021. T. 11. № 1. S. 96–103. EDN DJWCXX.
11. Zalaev R.D. Operativno-rozysknaya harakteristika prestuplenij, sovershaemyh s ispol'zovaniem informacionno-telekommunikacionnykh tekhnologii // *Alleya nauki*. 2024. T. 1. № 3 (90). S. 137–141. EDN BNUZEC.
12. Policing the data: Can data analytics help law enforcement? / J. Partridge [et al.] // *Journal of Information Technology Teaching Cases*. 2025. T. 15. № 1. P. 90–94.
13. Data protection and privacy of the internet of healthcare things (IoHTs) / J. Shahid [et al.] // *Applied sciences*. 2022. T. 12. № 4. P. 1927.
14. Shkhagapsoev Z.L. O nazrevshih processah izmeneniya podgotovki kadrov dlya pravoohranitel'nyh organov Rossii, svyazannyh s peremeshcheniem prestupnoj deyatel'nosti v virtual'nyuyu sferu // *Probely v rossijskom zakonodatel'stve*. 2022. T. 15. № 2. S. 118–121. EDN YUFZAU.
15. Pozdnyakov A.N. O chastnoj teorii operativno-rozysknoj deyatel'nosti po bor'be s prestupleniyami, sovershaemymi s ispol'zovaniem informacionno-kommunikacionnykh tekhnologij // *Trudy Akademii upravleniya MVD Rossii*. 2022. № 3 (63). S. 119–125. DOI: 10.24412/2072-9391-2022-363-119-125 EDN SNOCUU.
16. Artificial intelligence: An advanced evolution in forensic and criminal investigation / S. Yadav [et al.] // *Current Forensic Science*. 2023. Vol. 1. № 1. P. e190822207706.
17. Using information technology for comprehensive analysis and prediction in forensic evidence / F.K.H. Mihna [et al.] // *Mesopotamian journal of Cybersecurity*. 2024. Vol. 3. № 1. P. 4–16.
18. Informacionno-kommunikacionnye tekhnologii v mekhanizme prestupnoj deyatel'nosti / S.I. Usachev [i dr.] // *Sibirskij yuridicheskij vestnik*. 2024. № 3 (106). S. 110–117. DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.110 EDN CSDDCM.
19. Does information communication technology facilitate or solve crime? Exploring the experience of law enforcement practitioners in three countries / S. Kirby [et al.] // *Policing: An International Journal*. 2025. Vol. 48. № 5. P. 1069–1082.
20. Identity, crimes, and law enforcement in the metaverse / H.X. Qin [et al.] // *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025. Vol. 12. № 1. P. 1–15.
21. Kudinova A.A. Ispol'zovanie cifrovyyh tekhnologij v raskrytii i rassledovanii prestuplenij: sovremennoe sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya // *Yusticiya*. 2023. № 1. S. 112–119. EDN APAEUH.
22. Sarkisyan G.G. Operativno-analiticheskie sredstva deanonimizacii pol'zovatelej v messendzherah i seti Internet: nauchnye podhody k ponimaniyu i sodержaniyu, algoritm provedeniya // *Trudy Akademii upravleniya MVD Rossii*. 2025. № 2 (74). S. 114–121. DOI: 10.24412/2072-9391-2025-274-114-121 EDN LVPUMS.
23. Data science, artificial intelligence and the third wave of digital era governance / P. Dunleavy [et al.] // *Public Policy and Administration*. 2025. Vol. 40. № 2. P. 185–214.
24. Digital Forensics Investigation Approaches in Mitigating Cybercrimes: A Review / A.A. Kazaure [et al.] // *Journal of Information Science Theory & Practice (JISaP)*. 2023. Vol. 11. № 4.
25. Effectiveness of Forensic Computer Modeling for Predicting Wartime Crimes / Y. Yelaiev [et al.] // *Pakistan Journal of Criminology*. 2024. Vol. 16. № 2.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 26.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.04.2026;
принята к публикации: 30.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 26.03.2026; approved after review: 27.04.2026;
accepted for publication: 30.04.2026

Информация об авторах:

Акапьев Виктор Львович, доцент кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности ОВД Белгородского юридического института МВД России им. И.Д. Путилина (308024, г. Белгород, ул. Горького, д. 71), кандидат педагогических наук, e-mail: akapjev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0560-8117>, SPIN-код: 6275-6804

Борисенко Александр Васильевич, преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности ОВД Белгородского юридического института МВД России им. И.Д. Путилина (308024, г. Белгород, ул. Горького, д. 71), кандидат физико-математических наук, e-mail: borisenko02.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2539-3096>, SPIN-код: 4684-8218

Новикова Екатерина Анатольевна, начальник кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности ОВД Белгородского юридического института МВД России им. И.Д. Путилина (308024, г. Белгород, ул. Горького, д. 71), кандидат юридических наук, e-mail: tomchik1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6572-7732>, SPIN-код: 3557-6819

Information about authors:

Akapyev Viktor L., associate professor of the department of information and computer technologies in the activities of the department of internal affairs Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of the Russian Federation named after I.D. Putilin (308024, Belgorod, Gorky street, 71), candidate of pedagogical sciences, e-mail: akapjev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0560-8117>, SPIN: 6275-6804

Borisenko Alexander V., lecturer at the department of information and computer technologies in the activities of the department of internal affairs Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of the Russian Federation named after I.D. Putilin (308024, Belgorod, Gorky street, 71), candidate of physico-mathematical sciences, e-mail: borisenko02.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2539-3096>, SPIN: 4684-8218

Novikova Ekaterina A., head of the department of information and computer technologies in the activities of the department of internal affairs Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of the Russian Federation named after I.D. Putilin (308024, Belgorod, Gorky street, 71), candidate of law sciences, e-mail: tomchik1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6572-7732>, SPIN: 3557-6819

Аналитическая статья

УДК 004.9; 004.75; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-137-145

АНАЛИЗ СРЕДСТВ И ПОДХОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Саратова Татьяна Евгеньевна;

✉Воронцова Евгения Константиновна.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉vorontsova@mirea.ru

Аннотация. Представлен обзорный сравнительный анализ средств и подходов построения взаимосвязей между компонентами образовательных программ. При проведении исследования использованы методы системного анализа и аналитического обзора, сравнительного анализа, а также обобщения выявленных ограничений. Проанализированы существующие подходы к построению связей между компонентами образовательных программ, такие как онтологические, графовые, семантические и основанные на методах обработки естественного языка. Онтологические модели формализуют структуру образовательной программы, графовые модели выявляют междисциплинарные связи, а семантические и методы обработки естественного языка позволяют автоматизировать сопоставление результатов обучения студентов, тем дисциплин и учебных материалов. Исследуемые подходы имеют ряд ограничений: зависимость от ручной разметки, слабый учет фактического содержания рабочих программ дисциплин, ограниченность анализа в рамках отдельного курса. Сформированы выводы о необходимости формирования комплексного подхода и заложена основа для проведения дальнейших исследований в области построения взаимосвязей между компонентами образовательных программ.

Ключевые слова: образовательные программы, рабочая программа дисциплины, графовая модель, результаты обучения, семантический анализ, онтология, результаты обучения, учебный план

Для цитирования: Саратова Т.Е., Воронцова Е.К. Анализ средств и подходов идентификации связей между компонентами образовательных программ // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 137–145. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-137-145

Analytical article

ANALYSIS OF MEANS AND APPROACHES FOR IDENTIFYING RELATIONS BETWEEN COMPONENTS OF EDUCATIONAL PROGRAMS

Saratova Tatiana E.;

✉Vorontsova Evgenia K.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia

✉vorontsova@mirea.ru

Abstract. The article presents an overview comparative analysis of the means and approaches to building relationships between the components of educational programs. The study used the methods of system analysis and analytical review, comparative analysis, as well as generalization of the identified limitations. The existing approaches to building relationships between the components of educational programs, such as ontological, graph, semantic, and based on natural language processing methods, are analyzed. Ontological models formalize the structure of an educational program, graph models identify interdisciplinary connections, and semantic and based on natural language processing models allow for the automation of matching student learning outcomes, discipline topics, and educational materials.

However, these approaches have several limitations, such as dependence on manual markup, limited consideration of the actual content of discipline curricula, and limited analysis within a single course. The study concludes that a comprehensive approach is necessary and provides a foundation for further research on building relationships between the components of educational programs.

Keywords: educational programs, work program of the discipline, graph model, learning outcomes, semantic analysis, ontology, learning outcomes, curriculum

For citation: Saratova T.E., Vorontsova E.K. Analysis of means and approaches for identifying relations between components of educational programs // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 137–145. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-137-145

Введение

Современный образовательный процесс в высших учебных заведениях регламентируется большим количеством документов, влекущих за собой формирование большого объема взаимосвязанных данных. Одним из основных документов является образовательная программа (ОП) – комплекс основных характеристик образования и организационно-педагогических условий. В состав ОП высшего учебного заведения включают: учебный план, рабочие программы дисциплин (РПД), в которых представляются темы и их описания, фонды оценочных средств, компетенции и индикаторы, дескрипторы обучения, методические материалы и иные компоненты. При формировании и актуализации ОП необходимо учитывать их связи между собой.

Актуальность задачи усиливается переходом высшего образования к компетентностной модели. В данной модели качество ОП определяется не только перечнем дисциплин, а также последовательностью и содержательностью формируемых заявленных результатов обучения. На практике чаще всего связи между дисциплинами, результатами обучения и компетенциями задаются формально. В документах указывается, что дисциплина формирует определенные компетенции, однако не всегда проверяется, действительно ли темы, задания и оценочные средства раскрывают заявленный результат. Отсюда могут возникать содержательные пробелы, дублирование одних и тех же тем на разных дисциплинах, нарушение логики последовательности дисциплин, слабая связь между РПД и компетенциями, а также методическими материалами.

В ходе исследования было выявлено несколько направлений решения данной проблемы: онтологическое представление, графовый анализ, онтологии компетенций и образовательных траекторий, а также автоматизация сопоставления учебных планов и применение NLP/LLM-методов. В статье [1] предлагается формализованная онтологическая модель ОП, в которой выделяют такие элементы, как ФГОС (федеральный государственный стандарт), направление подготовки, учебный план, дисциплины, модули, практики, компетенции и формы обучения. Подход, представленный в данной работе, важен тем, что переводит ОП из набора различных документов в целостную систему взаимосвязанных элементов. Однако в работе в основном описывается структура ОП и не учитывается анализ фактического содержания внутри нее. Близкий подход представляется в работе [2]. ОП рассматривается как семантическая модель, которая включает дисциплины, темы, занятия, компетенции и формы аттестации. Авторы предлагают программное обеспечение для построения, визуализации и анализа модели, а также сравнение РПД. В данной работе есть переход от уровня учебного плана к уровню РПД и тематического содержания. Однако следует отметить, что смысловое сопоставление имеет ограничения, поскольку оно основано на структурированном описании и совпадении текстовых элементов, а не на контекстном и семантическом сходстве.

Авторы статьи [3] используют методы графового анализа, чтобы представить учебный план в виде взвешенного неориентированного графа. Вершинами в графе являются дисциплины, а ребра отражают междисциплинарные связи, которые основаны на общих компетенциях

и трудоемкости. Такой подход позволяет визуализировать структуру учебного плана, выявить ключевые дисциплины, определять группы взаимосвязанных дисциплин и обобщать характеристики ОП. Формальные связи между дисциплинами могут стать недостатком данного подхода, поскольку они определяются через общие компетенции и не анализируют само наполнение дисциплин, результатов обучения, а также РПД.

В статье [4] проведено исследование онтологий компетенций и образовательные траектории, где предлагается строить адаптивную модель компетенций в области информационных технологий. Построение данной модели основывается на связи специализированной онтологии компетенций с профессиональными образовательными стандартами, общими онтологиями и базами знаний. Данный подход важен для согласования образовательных и профессиональных требований, но нуждается в детализации на уровне конкретной ОП, ее дисциплин и учебных материалов.

В области автоматизированного сопоставления учебных планов и применения NLP/LLM-методов решается задача автоматического сопоставления итогов обучения по дисциплинам с результатами ОП на основе предобработки текста, векторизации и косинусной близости [5]. В работе [6] рассматривается автоматизация сопоставления учебных планов с использованием LLM, семантического сходства, классификации и графовых методов для выявления пробелов и кластеров дисциплин. Авторы исследования [7] сравнивают лексические, embedding и LLM методы сопоставления ресурсов Moodle с темами курса и показывают, что качество сопоставления существенно зависит от полноты и информативности текстового описания.

В зарубежных исследованиях активно развиваются подходы, которые объединяют онтологии, графы знаний и методы обработки естественного языка. Предлагается онтологическая модель компетентностно-ориентированной ОП, в которой компетенции представлены в виде иерархического дерева, а зависимости между курсами и компетенциями используются для проверки прerreквизитов [8]. Также описывается автоматизированное построение онтологии учебного плана на основе реальных документов образовательной программы, выделяя следующие уровни «курсы – результаты обучения – знания» [9]. Авторы статьи [10] предлагают CourseKG – образовательный граф знаний, строящийся на основе информации о курсе с использованием BERT-моделей для извлечения сущностей и отношений. А в обзорной работе [11] показывают рост числа исследований, связанных с графами знаний в образовании, и выделяют их применение в персонализированном обучении, рекомендациях, управлении курсами и моделировании учебного содержания.

Таким образом, существующие исследования подтверждают перспективность онтологического, графового и семантического подходов в анализе ОП. Однако большинство работ либо формализуют структуру программы без глубокого анализа содержания, либо анализируют отдельный курс, либо строят графы на основе уже заданных формальных связей. Отсюда следует, что данные подходы недостаточно проработаны и нужен комплексный подход, который одновременно учитывает структуру ОП, фактическое содержание РПД, семантическое сходство текстов и т.д.

Таким образом, цель исследования заключается в анализе существующих средств и подходов к построению взаимосвязей между компонентами ОП и обосновании семантико-графового подхода, который позволяет объединить формальные, структурные и содержательные связи между элементами ОП.

Методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается ОП высшего учебного заведения как комплекс взаимосвязанных компонентов.

Предметом исследования являются методы построения и анализа взаимосвязей между указанными компонентами. В работе использованы методы системного анализа и аналитического обзора отечественных и зарубежных источников, сравнительного анализа подходов поиска взаимосвязей между компонентами ОП, а также обобщения выявленных ограничений.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа отечественных и зарубежных публикаций выявлено, что построение взаимосвязей между компонентами ОП решается в рамках нескольких устойчивых научных направлений. В рамках настоящего исследования выделены пять основных направлений: онтологическое моделирование, графовые модели и сетевой анализ, методы картирования программы (curriculum mapping), методы обработки естественного языка (NLP и LLM), а также графы знаний. Каждое из представленных направлений решает часть одной общей задачи: одни подходы формализуют структуру ОП, другие выявляют связи между дисциплинами, третьи автоматизируют сопоставление результатов обучения, тем внутри дисциплин и учебных материалов. Однако ни одно из направлений в отдельности не обеспечивает полного анализа взаимосвязей между компонентами ОП.

Онтологическое направление фокусируется на формализации ОП в виде набора различных сущностей и взаимосвязей между ними. В работах данного направления ОП рассматривается как иерархическая система, которая включает в себя различные компоненты [12, 13]. Подходы с использованием онтологий отличаются высоким уровнем формального описания ОП и позволяют представить ее как единую структурированную систему. Ограничением для них будет недостаточный учет реального содержания образовательных документов, поскольку связи фиксируются заранее и зависят от описания предметной области экспертом.

Графовый подход предполагает рассмотрение ОП в виде системы взаимосвязанных элементов, где ее компоненты будут представлены как вершины, а ребра – как связи между ними. Методы теории графов являются основой для исследований в рамках данного подхода, которые позволяют анализировать структуру ОП [14–17]. Такое представление позволяет не только визуализировать ОП, а также рассчитывать количественные метрики в виде степени связанности элементов, плотности сети и др. Это позволяет проводить более формализованную оценку ОП. Стоит отметить, что данный подход, часто опирается на формально заданные связи и не учитывает семантическое содержание. В результате граф отражает структуру ОП, но не ее содержательную согласованность.

Методы картирования программы позволяют установить соответствия между различными уровнями ОП, особенно между результатами обучения отдельных дисциплин и результатами ОП в целом. Традиционно данный подход реализуется в виде матриц соответствия, формируемых экспертным путем. Ключевой особенностью данного направления является ориентация на фактические данные, извлекаемые из текстов образовательных документов. В отличие от онтологических подходов, где связи между компонентами задаются заранее, в нем связи выявляются на основе анализа текстовых формулировок. Этот подход также имеет свои ограничения, он фокусируется на уровне анализа и недостаточно учитывает структурный контекст ОП [5, 6, 13, 18].

Методы обработки естественного языка направлены на поиск смысловых связей между текстами в рамках ОП. В этом направлении применяются как классические методы (TF-IDF, cosine similarity), так и современные нейросетевые модели (BERT, Sentence-BERT, LLM) [5, 19–22]. Данное направление отличается высокой чувствительностью к смысловому содержанию, но не учитывает структуру ОП и не позволяет интерпретировать тип выявленных связей. Например, высокая семантическая близость позволяет различить дублирование, развитие темы или пререквизитную зависимость.

Графы знаний представляют собой усовершенствованные графовые модели с добавлением дополнительного семантического уровня. Гибридные модели, сочетающие в себе оба подхода (графовые и семантические), представляют собой наиболее перспективное направление, поскольку позволяют учитывать как структуру, так и содержание ОП. Тем не менее, на сегодняшний день такие модели недостаточно ориентированы на комплексный анализ ОП как целостных систем [4, 10, 11, 23, 24].

Выявленные группы подходов к построению взаимосвязей между компонентами ОП представлены в таблице.

Таблица

Группы подходов к построению взаимосвязей между компонентами ОП

Группа подходов	Основная идея	Типовые объекты	Сильные стороны	Ограничения
Онтологическое моделирование	Формальное описание сущностей и отношений	ОП, дисциплины, компетенции, ФГОС, результаты обучения	Строгая структура, машинная интерпретируемость, возможность логического вывода	Требуют экспертного проектирования, часто слабо учитывают фактический текст РПД
Графовые модели и сетевой анализ	Представление программы как сети связанных элементов	Дисциплины, компетенции, темы, понятия	Наглядность, расчет метрик, выявление кластеров	Часто строятся по формальным связям без семантического анализа
Картирование программы (curriculum mapping)	Сопоставление результатов обучения, компетенций, тем и оценивания	Результаты обучения по дисциплине и по ОП	Полезно для аккредитации и контроля качества	Трудоемкость ручного заполнения, риск формального соответствия
Методы обработки естественного языка (NLP и LLM)	Автоматическое сопоставление текстовых формулировок. Использование языковых моделей для интерпретации и классификации	Результаты обучения, темы, материалы, компетенции. Тексты РПД, темы, задания, результаты обучения	Масштабируемость, снижение ручного труда. Учет контекста, возможность объяснения связей	Зависимость от качества текста, проблемы с синонимией и короткими описаниями. Проблемы воспроизводимости, необходимость валидации экспертами
Графы знаний и гибридные модели	Объединение семантики, структуры и отношений	Учебные понятия, ресурсы, пререквизиты, траектории	Поддержка рекомендаций, траекторий и поиска	Часто ограничены отдельным курсом или предметной областью

Следовательно, ключевым результатом проведенного анализа является вывод о необходимости перехода от бинарного сопоставления «связано – не связано» к типизированному описанию отношений между компонентами программы. Одинаковое или близкое значение семантической меры может соответствовать разным отношениям: дублированию, логичному развитию темы, частичному пересечению, пререквизитной зависимости или формальному совпадению без содержательного подтверждения. Поэтому для интерпретации связи необходимо учитывать не только текстовую близость, но и тип сравниваемых элементов, их положение в учебном плане, семестр изучения, общие компетенции, индикаторы, результаты обучения и оценочные средства.

Предлагаемый семантико-графовый подход может включать следующие уровни: нормативно-структурный, содержательный, семантический, а также графовый. На нормативно-структурном уровне фиксируются формальные данные учебного плана: перечень дисциплин, семестры, трудоемкость, формы контроля, компетенции и индикаторы. Содержательный уровень предполагает извлечение из РПД разделов, тем, результатов обучения, различных понятий, видов занятий, заданий и критериев оценивания. На семантическом уровне текстовые элементы преобразуются в векторные представления, что позволяет рассчитать смысловую близость между темами, результатами обучения, индикаторами и оценочными средствами. На графовом уровне все компоненты объединяются в единую модель (неоднородный граф), что дает возможность анализировать как прямые, так и скрытые связи между ними.

Пример возможных связей семантико-графового подхода представлен на рисунке.

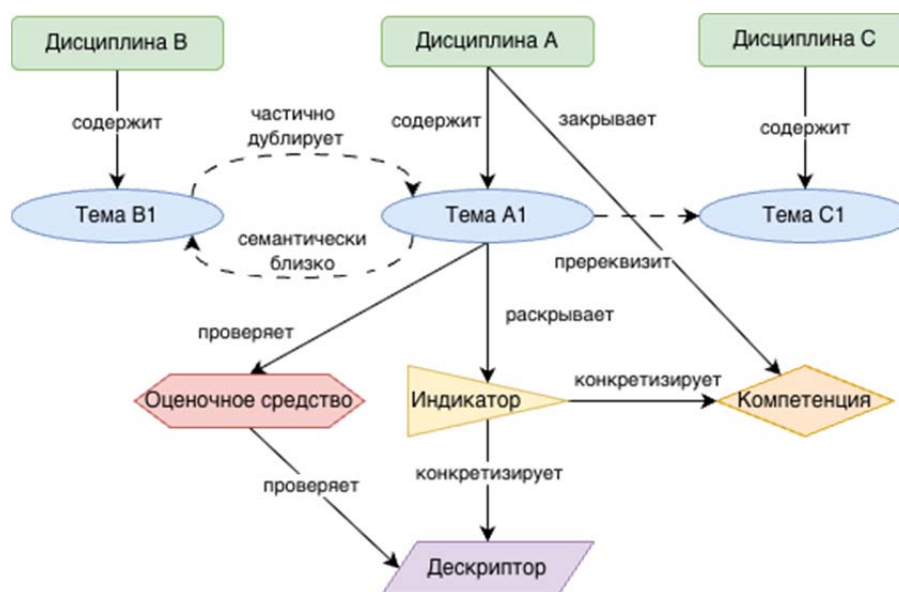


Рис. Типы связей в семантико-графовой модели

Поскольку семантический анализ в контексте построения графа позволяет выявлять степень сходства между компонентами ОП, представленные связи включают в себя не только бинарные отношения, но и более сложные взаимосвязи, учитывающие контекст и значение материалов.

Заключение

Таким образом, анализ существующих подходов и средств к построению взаимосвязей между компонентами ОП показал, что ни одно из направлений не обеспечивает комплексного решения задачи анализа взаимосвязей между компонентами ОП.

Развитием существующих идей может стать семантико-графовый подход, объединяющий формальные связи ОП, смысловое сходство текстовых компонентов и графовую структуру учебного плана. Такой подход позволяет перейти от формального соответствия к содержательной диагностике ОП. На основании предложенной семантико-графовой структуры в последующих работах будут формироваться методы и алгоритмы построения подобного представления взаимосвязей между компонентами ОП.

Список источников

1. Назаров Е.В. Онтологическое представление основной образовательной программы // Вестник кибернетики. 2021. № 3 (43). С. 51–59. DOI: 10.34822/1999-7604-2021-3-51-59 EDN VMICXV
2. Буланова И.А., Пылькин А.Н. Семантическая модель образовательной программы и программное обеспечение для ее построения, визуализации и анализа // Вестник РГРТУ. 2023. № 86. С. 133–144. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-133-144
3. Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования / Т.В. Зыкова [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19. № 1. С. 104–116. DOI: 10.25559/SITITO.019.202301.104-116 EDN KZHJWJ
4. Тимофеев А.Н. Онтологический подход к разработке адаптивной модели компетенций и профессиональной подготовки в сфере информационных технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (35-1). С. 42–47. EDN HKVJSU
5. Automating the mapping of course learning outcomes to program learning outcomes using natural language processing for accurate educational program evaluation / N. Zaki [et al.] // Research Square. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2196467/v1

6. Vesilo R. Automation of curriculum mapping tools: managing the challenges of generic and specific data classifications using large language models and graphical methods // 36th Australasian Association for Engineering Education Annual Conference (AAEE2025): Engineering education: between the human and the digital. Engineers Australia, 2025. DOI: 10.3316/informit.T2026031700006491438511833
7. Gancevska B., Ramanauskaitė S. Mapping Moodle resources to course topics using text similarity methods and expert evaluation // Applied Sciences. 2026. Vol. 16. P. 2039. DOI: 10.3390/app16042039
8. Ontological approach for competency-based curriculum analysis / M. Milosz [et al.] // Heliyon. 2024. Vol. 10. № 7. P. e29046. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29046
9. Piriyaongpipat P., Goldin S., Ditcharoen N. An alternative approach to ontology-based curriculum development in higher education // Smart Learning Environments. 2024. Vol. 11. № 1. P. 20. DOI: 10.1186/s40561-024-00307-8
10. CourseKG: an educational knowledge graph based on course information for precision teaching / Y. Li [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. P. 2710. DOI: 10.3390/app14072710
11. A survey of knowledge graph approaches and applications in education / K. Qu [et al.] // Electronics. 2024. Vol. 13. № 13. P. 2537. DOI: 10.3390/electronics13132537
12. Корнеев Д.Г., Гаспарян М.С., Микрюков А.А. Онтологический подход к моделированию инновационных процессов на примере распределенной образовательной сети вуза // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 5. С. 4–13. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-4-13
13. Smith H., Chittams J. Defining best practices and validation for curriculum mapping // Cogent Education. 2024. Vol. 11. DOI: 10.1080/2331186X.2024.2342662
14. Алгоритм анализа и оценки учебных планов образовательных программ / Т.В. Зыкова [и др.] // Информатика и образование. 2024. Т. 39. № 1. С. 52–64. DOI: 10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64 EDN UNSWXG
15. Кузьмина Е.А., Низамова Г.Ф. Формирование учебного плана на основе графовой модели // Информатика и образование. 2020 № 5. С. 33–43. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-5-33-43
16. Wengle E., Knorn S., Varagnolo D. COnCUR – COherence in CURricula: a tool to assess, analyze and visualize coherence in higher education curricula // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53. P. 17598–17603. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2675
17. Graph-theoretic approaches and tools for quantitatively assessing curricula coherence / D. Varagnolo [et al.] // European Journal of Engineering Education. 2021. Vol. 46. № 3. P. 344–363. DOI: 10.1080/03043797.2019.1710465
18. Wang Y., Zhan Z., Wang H. Network analysis of outcome-based education curriculum system: a case study of environmental design programs in medium-sized cities // Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 7091. DOI: 10.3390/su17157091
19. Krishnan S., Rajendran S., Zakariah M. A secured accreditation and equivalency certification using Merkle mountain range and transformer-based deep learning model for the education ecosystem // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. P. 22511. DOI: 10.1038/s41598-025-06789-x
20. Дышенов Б.А., Найханова Л.В., Ширапов Д.Ш. Модуль подготовки коллекции рабочих программ для латентно-семантического анализа // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 57–61. EDN YGGCKV
21. Минаев Д.В. Подходы к проектированию и актуализации компетентностных моделей образовательных программ на основе интеллектуального анализа вакансий работодателей // Управленческое консультирование. 2023. № 10 (178). С. 45–68. DOI: 10.22394/1726-1139-2023-10-45-68 EDN QXMAPG
22. Александров А.С., Зарипова В.М. Анализ требований к ИТ-специалистам на основе вакансий, образовательных стандартов и предпочтений студентов с применением больших языковых моделей // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12. № 5. С. 80–94. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-5-80-94 EDN ELOENB

23. Abu-Salih B., Alotaibi S. A systematic literature review of knowledge graph construction and application in education // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 3. P. e25383. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25383

24. Fettach Y., Ghogho M., Benatallah B. Knowledge graphs in education and employability: a survey on applications and techniques // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3194063

References

1. Nazarov E.V. Ontologicheskoe predstavlenie osnovnoj obrazovatel'noj programmy // *Vestnik kibernetiki*. 2021. № 3 (43). S. 51–59. DOI: 10.34822/1999-7604-2021-3-51-59 EDN VMICXV

2. Bulanova I.A., Pyl'kin A.N. Semanticheskaya model' obrazovatel'noj programmy i programmnoe obespechenie dlya ee postroeniya, vizualizacii i analiza // *Vestnik RGRTU*. 2023. № 86. S. 133–144. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-133-144

3. Primenenie silovogo algoritma vizualizacii grafov dlya analiza uchebnyh planov obrazovatel'nyh programm vysshego obrazovaniya / T.V. Zyкова [i dr.] // *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*. 2023. T. 19. № 1. S. 104–116. DOI: 10.25559/SITITO.019.202301.104-116 EDN KZH0WJ

4. Timofeev A.N. Ontologicheskij podhod k razrabotke adaptivnoj modeli kompetencij i professional'noj podgotovki v sfere informacionnyh tekhnologij // *Intellectual'nye tekhnologii na transporte*. 2023. № 1 (35-1). S. 42–47. EDN HKVJSU

5. Automating the mapping of course learning outcomes to program learning outcomes using natural language processing for accurate educational program evaluation / N. Zaki [et al.] // *Research Square*. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2196467/v1

6. Vesilo R. Automation of curriculum mapping tools: managing the challenges of generic and specific data classifications using large language models and graphical methods // 36th Australasian Association for Engineering Education Annual Conference (AAEE2025): Engineering education: between the human and the digital. Engineers Australia, 2025. DOI: 10.3316/informit.T2026031700006491438511833

7. Gancevska B., Ramanauskaitė S. Mapping Moodle resources to course topics using text similarity methods and expert evaluation // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. P. 2039. DOI: 10.3390/app16042039

8. Ontological approach for competency-based curriculum analysis / M. Milosz [et al.] // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 7. P. e29046. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29046

9. Piriyaopongpipat P., Goldin S., Ditcharoen N. An alternative approach to ontology-based curriculum development in higher education // *Smart Learning Environments*. 2024. Vol. 11. № 1. P. 20. DOI: 10.1186/s40561-024-00307-8

10. CourseKG: an educational knowledge graph based on course information for precision teaching / Y. Li [et al.] // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. P. 2710. DOI: 10.3390/app14072710

11. A survey of knowledge graph approaches and applications in education / K. Qu [et al.] // *Electronics*. 2024. Vol. 13. № 13. P. 2537. DOI: 10.3390/electronics13132537

12. Korneev D.G., Gasparian M.S., Mikryukov A.A. Ontologicheskij podhod k modelirovaniyu innovacionnyh processov na primere raspredelennoj obrazovatel'noj seti vuza // *Otkrytoe obrazovanie*. 2019. T. 23. № 5. S. 4–13. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-4-13

13. Smith H., Chittams J. Defining best practices and validation for curriculum mapping // *Cogent Education*. 2024. Vol. 11. DOI: 10.1080/2331186X.2024.2342662

14. Algoritm analiza i ocenki uchebnyh planov obrazovatel'nyh programm / T.V. Zyкова [i dr.] // *Informatika i obrazovanie*. 2024. T. 39. № 1. S. 52–64. DOI: 10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64 EDN UNSWXG

15. Kuz'mina E.A., Nizamova G.F. Formirovanie uchebnogo plana na osnove grafovoj modeli // *Informatika i obrazovanie*. 2020 № 5. S. 33–43. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-5-33-43

16. Wengle E., Knorn S., Varagnolo D. COncUR – COherence in CURricula: a tool to assess, analyze and visualize coherence in higher education curricula // *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53. P. 17598–17603. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2675

17. Graph-theoretic approaches and tools for quantitatively assessing curricula coherence / D. Varagnolo [et al.] // *European Journal of Engineering Education*. 2021. Vol. 46. № 3. P. 344–363. DOI: 10.1080/03043797.2019.1710465
18. Wang Y., Zhan Z., Wang H. Network analysis of outcome-based education curriculum system: a case study of environmental design programs in medium-sized cities // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 7091. DOI: 10.3390/su17157091
19. Krishnan S., Rajendran S., Zakariah M. A secured accreditation and equivalency certification using Merkle mountain range and transformer-based deep learning model for the education ecosystem // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 22511. DOI: 10.1038/s41598-025-06789-x
20. Dyshenov B.A., Najhanova L.V., Shirapov D.Sh. Modul' podgotovki kollekcii rabochih programm dlya latentno-semanticheskogo analiza // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017. № 2. S. 57–61. EDN YGGCKV
21. Minaev D.V. Podhody k proektirovaniyu i aktualizacii kompetentnostnyh modelej obrazovatel'nyh programm na osnove intellektual'nogo analiza vakansij rabotodatelej // *Upravlencheskoe konsultirovanie*. 2023. № 10 (178). S. 45–68. DOI: 10.22394/1726-1139-2023-10-45-68 EDN QXMAGP
22. Aleksandrov A.S., Zaripova V.M. Analiz trebovanij k IT-specialistam na osnove vakansij, obrazovatel'nyh standartov i predpochtenij studentov s primeneniem bol'shih yazykovykh modelej // *Computational Nanotechnology*. 2025. T. 12. № 5. S. 80–94. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-5-80-94 EDN ELOENB
23. Abu-Salih B., Alotaibi S. A systematic literature review of knowledge graph construction and application in education // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 3. P. e25383. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25383
24. Fettach Y., Ghogho M., Benatallah B. Knowledge graphs in education and employability: a survey on applications and techniques // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3194063

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 26.05.2026; одобрена после рецензирования: 27.06.2026; принята к публикации: 30.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 26.05.2026; approved after review: 27.06.2026; accepted for publication: 30.06.2026

Информация об авторах:

Саратова Татьяна Евгеньевна, заведующий кафедрой прикладной математики Института информационных технологий МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: saratova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4810-8734>

Воронцова Евгения Константиновна, старший преподаватель кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: vorontsova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0105-9325>

Information about authors:

Saratova Tatyana E., head of the department of applied mathematics at the institute of information technologies of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: saratova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4810-8734>

Vorontsova Evgenia K., senior lecturer of the software and IT-standard department at the institute of information technologies of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: vorontsova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0105-9325>

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Научная статья

УДК 614.845.1; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-146-160

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ОГNETУШИТЕЛЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

✉ Естехин Виталий Геннадьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ estekhin@inbox.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования является разработка научно обоснованной методики оснащения судов порошковыми огнетушителями, учитывающей мощность тепловыделения при пожаре, время доставки огнетушителя и его мощность теплопоглощения. В работе использован комплексный подход, включающий анализ действующих нормативных документов, натурные эксперименты по определению скорости движения людей с огнетушителями различных типоразмеров, имитационное моделирование в программе Pathfinder для расчета времени доставки, численное моделирование динамики пожара в программном комплексе PyroSim для определения мощности тепловыделения в судовых помещениях с учетом реальной пожарной нагрузки, а также аналитический расчет мощности теплопоглощения огнетушителей по стандартным методикам. Предложенная методика может быть использована при проектировании систем противопожарной защиты на строящихся и эксплуатируемых судах морского и речного флота, а также на объектах транспортной инфраструктуры. Результаты работы могут служить научно-техническим обоснованием для внесения изменений в действующие нормативные документы в области пожарной безопасности. Научной новизной работы является переход от статического нормативного подхода (основанного только на площади и функциональном назначении помещения) к динамической физико-математической модели, учитывающей реальную пожарную нагрузку, эргономические характеристики человека с огнетушителем и теплофизические параметры средств тушения. Реализация предложенной методики позволяет повысить вероятность успешной ликвидации пожара на начальной стадии силами экипажа, обоснованно оптимизировать расстановку первичных средств пожаротушения и снизить угрозу для жизни людей и окружающей среды.

Ключевые слова: скорость доставки огнетушителей, моделирование движения людских потоков с отягощением, методика оснащения судов огнетушителями, мощность тепловыделения, мощность теплопоглощения

Для цитирования: Естехин В.Г. Методика применения огнетушителей на объектах водного транспорта // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 146–160. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-146-160

Scientific article

METHODOLOGY FOR THE APPLICATION OF FIRE EXTINGUISHERS AT WATER TRANSPORT FACILITIES

✉ Estekhin Vitalii G.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ estekhin@inbox.ru

Abstract. The purpose of this study is to develop a scientifically based methodology for equipping ships with dry powder fire extinguishers, taking into account the heat release rate during a fire, the extinguisher delivery time, and its heat absorption capacity. The work employs a comprehensive approach including the analysis of current regulations, full-scale experiments to determine the speed of people carrying fire extinguishers of various sizes, simulation modeling in Pathfinder software to calculate delivery time, numerical fire dynamics modeling in the PyroSim software package to determine the heat release rate in ship compartments considering actual fire loads, as well as analytical calculation of the heat absorption capacity of fire extinguishers using standard methods. The scientific novelty of this work lies in the transition from a static regulatory approach (based solely on room area and functional purpose) to a dynamic physico-mathematical model that considers the actual fire load, ergonomic characteristics of a person carrying an extinguisher, and the thermophysical parameters of extinguishing agents. Implementation of the proposed methodology increases the probability of successful fire suppression at an early stage by the crew, allows reasonable optimization of the placement of primary fire extinguishing equipment, and reduces risks to human life and the environment.

Keywords: fire extinguisher delivery speed, evacuation simulation, crowd dynamics with encumbrance, methodology for equipping ships with fire extinguishers, heat release rate, heat absorption capacity

For citation: Estekhin V.G. Methodology for the application of fire extinguishers at water transport facilities // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 146–160. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-146-160

Введение

Пожары на судах морского и речного флота характеризуются высокой динамикой развития, особенно если судно находится в автономном плавании (открытом море). Осложняющим фактором в данном случае является отсутствие возможности привлечения дополнительных сил и средств для ликвидации пожара, соответственно, основная тяжесть борьбы с огнем возлагается только на силы экипажа судна. Помимо риска уничтожения судна возникает угроза жизни и здоровья членов экипажа (пассажиров), а также масштабного экологического ущерба для акваторий, соответственно, ликвидация пожара на начальной стадии развития с использованием первичных средств пожаротушения (ПСП) является актуальной и приоритетной задачей.

К настоящему времени в этом направлении был проведен ряд исследований. В работе [1] представлен анализ статистических данных, свидетельствующий о низкой эффективности существующих судовых средств пожаротушения, в том числе первичных (огнетушителей). Одной из ключевых причин низкой эффективности применения ПСП на водном транспорте является несовершенство действующего методического аппарата оснащения объектов защиты огнетушителями [2]. Действующие нормативные документы¹ [3–5] регламентируют расстановку огнетушителей, исходя из следующих параметров:

¹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 16 сент. 2020 г. № 1479). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

- площадь защищаемого помещения;
- функциональное назначение помещения;
- категория по взрывопожарной опасности.

Данный подход оснащения судов огнетушителями не учитывает мощность тепловыделения (МТВ) из зоны горения, исходя из удельной пожарной нагрузки судового помещения. Экспериментально подтверждено, что на начальной стадии развития пожара рост МТВ, вплоть до определенного времени, не зависит от площади помещения и его функционального назначения. Отсюда следует, что требования оснащать объекты защиты огнетушителями, исходя только из площади помещения и его функционального назначения, является недостаточным – при оснащении объектов защиты огнетушителями необходимо учитывать МТВ. В работе автором предлагается принципиально иной подход параметризации огнетушителей, в основе которого лежит мощность теплопоглощения (МТП) огнетушащего вещества огнетушителя из зоны горения. В целях повышения эффективности применения ПСП на судах необходим иной критерий оснащения судов огнетушителями, который будет классифицировать помещения объекта защиты, исходя из теплофизических характеристик пожарной нагрузки и огнетушащего вещества, то есть по МТВ и МТП [6–8]. Расстановка огнетушителей на объекте защиты является также одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность применения ПСП, поскольку скорость их доставки к очагу пожара будет оказывать влияние на время свободного развития пожара.

В научных исследованиях [9, 10] опубликованы экспериментальные данные натурных испытаний по определению скорости движения людей с огнетушителями различных типоразмеров. Для каждого типоразмера огнетушителя были определены поправочные коэффициенты, учитывающие влияние массы и габаритов огнетушителя на скорость движения человека. Полученные расчетно-экспериментальные значения и коэффициенты были апробированы в программном продукте Pathfinder² [11].

В настоящем исследовании для обоснования методики оснащения судов ПСП применяются порошковые огнетушители, основными преимуществами которых являются:

- универсальность, которая заключается в возможности ликвидации пожаров класса «А, В, С, D, Е»³⁴⁵ (на судне одновременно присутствуют все типы горючих материалов: отделка кают (А), топливо в машинно-котельном отделении (В), газотурбинные установки (С), электрощитовые и оборудование (Е);
- высокая эффективность тушения, так как основными механизмами прекращения горения порошковыми составами являются ингибирование и охлаждение зоны горения между частицами порошка во фронте струи [8, 9], огнетушащий эффект порошкового огнетушителя превышает эффект охлаждения и разбавления двуокисью углерода, а также воды;
- работоспособность в широком температурном диапазоне (до -40 °С), что актуально для судов, работающих в арктических широтах или в зимний период времени;
- длительный срок службы, простота обслуживания и относительно низкая стоимость.

Разрабатываемая методика оснащения судов порошковыми огнетушителями предполагает комплексный учет мощности тепловыделения при пожаре, времени доставки огнетушителя и его мощности теплопоглощения.

² Программа Pathfinder – расчет времени эвакуации людей

³ ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁴ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁵ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 16 сент. 2020 г. № 1479). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

Основная часть

Эффективность применения огнетушителей при тушении определяется двумя ключевыми параметрами: временем доставки огнетушителя к очагу пожара и его МТП огнетушащего вещества. Время доставки огнетушителя оказывает влияние на развитие пожара (МТВ) и зависит от места расположения ПСП относительно объекта защиты, а также от типоразмера (массы) и эргономических характеристик огнетушителя [12].

Время $\tau_{\text{общ}}$ зависит от времени движения агента до места расположения огнетушителя и его обратного пути к очагу пожара с учетом типоразмера (массы) огнетушителя [11]:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{бн}} + \tau_{\text{псп}}, \quad (1)$$

где: $\tau_{\text{общ}}$ – общее время доставки огнетушителя при обнаружении агентом возгорания по внешним признакам, с; $\tau_{\text{бн}}$ – время движения агента до огнетушителя, с; $\tau_{\text{псп}}$ – время движения агента с огнетушителем до очага горения, с.

Для решения задачи по определению времени доставки огнетушителей на судне было проведено имитационное моделирование в программном продукте Pathfinder, который учитывает конструктивные особенности объекта, включая преодоление дверных проемов с огнетушителем. В работе [11] опубликованы численные параметры скорости движения агента с огнетушителем для каждого этапа и типоразмера (табл. 1).

Таблица 1

Параметры движения агента при моделировании

Номер этапа	Описание этапа	Скорость движения агента, м/с (типоразмер огнетушителя)
1	Движение агента из помещения, где находится очаг пожара, до помещения, где расположен огнетушитель (движение без отягощения)	1,67
2	Подъем огнетушителя из подставки и движение до двери помещения	1,44 (ОП-5) 1,54 (ОП-6) 1,43 (ОП-8) 1,41 (ОП-10)
3	Преодоление дверного проема от себя	0,34 (ОП-5) 0,36 (ОП-6) 0,34 (ОП-8) 0,33 (ОП-10)
4	Движение по горизонтальной поверхности.	1,61 (ОП-5) 1,71 (ОП-6) 1,59 (ОП-8) 1,57 (ОП-10)
5	Преодоление дверного проема на себя	0,29 (ОП-5) 0,31 (ОП-6) 0,29 (ОП-8) 0,27 (ОП-10)
6	Движение от дверного проема до условного очага пожара	1,62 (ОП-5) 1,72 (ОП-6) 1,60 (ОП-8) 1,58 (ОП-10)
Примечание: экспериментально установлено [10, 11], что типоразмеры огнетушителей (ОП 1–4) не оказывают влияние на скорость движения агента, следовательно, скорость движения с огнетушителями данных типоразмеров принимается 1,67 м/с		

Исходными данными для моделирования послужили технические характеристики и объемно-планировочные решения судов, предоставленные отечественными судостроительными заводами по запросам автора. В системе автоматизированного проектирования были построены модели судовых палуб пассажирского судна (рис. 1).

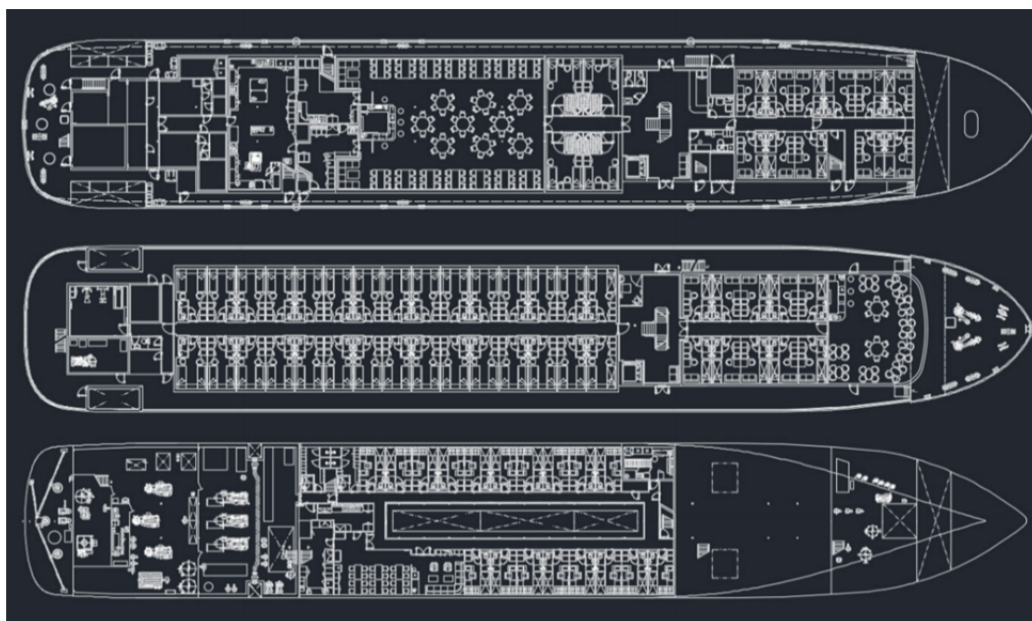


Рис. 1. Планировка судна, где проводилось моделирование

Все геометрические размеры судовых помещений на модельных палубах были строго соблюдены с учетом расположения мебели и интерьера, которые оказывали влияние на время движения агента. На рис. 2 представлена модель верхней палубы пассажирского теплохода (с заданными параметрами скорости движения агента), где проводилось моделирование по определению времени доставки огнетушителей.

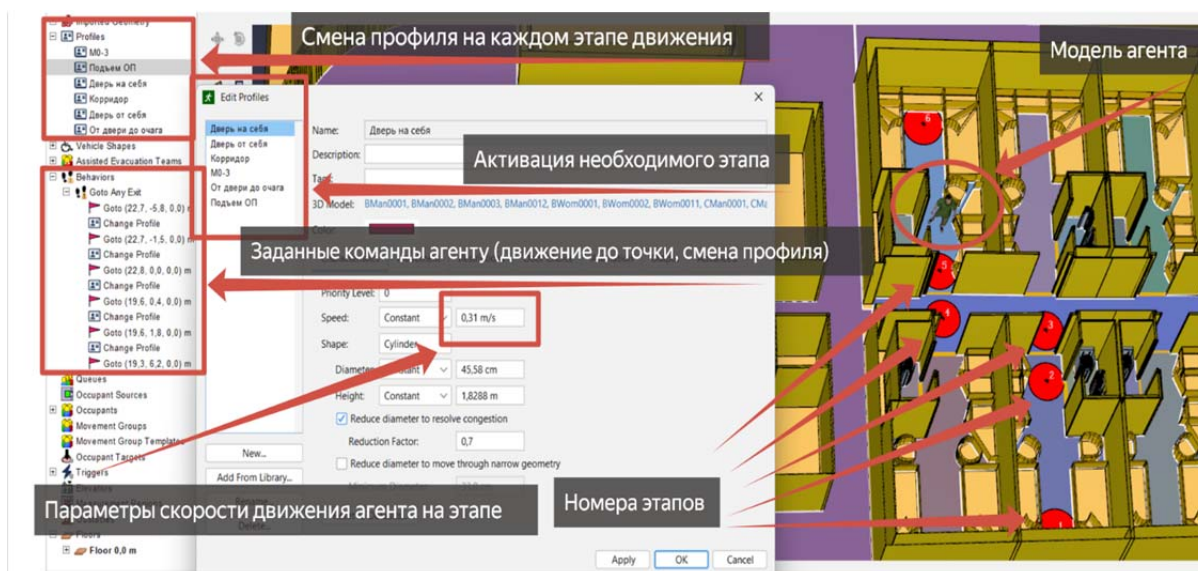


Рис. 1. Параметры скорости движения агента в Pathfinder

МТВ ($W_{ТВ}$) из зоны горения определяется пожарной нагрузкой конкретного помещения, а также временем свободного развития пожара ($\tau_{общ}$) до начала действия огнетушащего вещества.

Для определения МТВ судовых помещений был направлен запрос на отечественные судостроительные заводы о предоставлении характеристик и сведений о пожарной нагрузке (тип, масса применяемых материалов на судне). На основании данных, представленных судостроительными заводами, исходя из массы и процентного соотношения горючих материалов, была получена расчетная пожарная нагрузка и реакции горения с выделением газовых продуктов разложения и потребления кислорода для каждого судового помещения (табл. 2), которые были применены в качестве входных данных для каждого очага пожара в программном продукте Pyrosim⁶.

Таблица 2

Расчетные значения параметров реакций (входные данные)

Помещение судна	Данные для PyroSim									
	Молярная масса, г/моль	Низшая теплота сгорания, Дж/кг	Потребление O_2 , %	Выделение CO_2 , %	Выделение CO , %	Выделение C , %	Выделение HCl , %	Выделение N_2 , %	Выделение H_2O , %	Линейная скорость распространения пламени, м/с
Каюта № 416	92,95	16,52	3,23	2,04	0,48	0,20	0,00	12,14	5,05	0,012
Гостиная № 401	93,42	17,07	3,24	1,87	0,52	0,21	0,00	12,15	5,41	
Каюта № 301	93,22	16,88	3,24	1,95	0,50	0,21	0,00	12,18	5,26	
SPA-центр	92,24	18,07	3,40	1,78	0,52	0,20	0,00	12,75	5,89	
Каюта № 228	93,08	16,59	3,24	2,05	0,48	0,20	0,00	12,18	5,05	
Ресторан	92,45	17,89	3,40	1,86	0,52	0,20	0,00	12,74	5,70	0,012
Рулевая рубка	90,13	17,06	2,83	1,61	0,62	0,25	0,04	10,64	5,17	
Сигарная	92,57	17,84	3,37	1,81	0,52	0,20	0,00	12,64	5,75	

⁶ Программа Pyrosim – полевая модель пожара

На основании представленных данных была произведена оценка величины МТВ с использованием апробированного программного обеспечения, применяемого для численного моделирования газодинамических процессов (ANSYS, OpenFOAM, FDS, ЛОГОС Тепло). В рамках исследования численное моделирование развития пожара и динамики его опасных факторов на судне было реализовано в PyroSim (FDS), предназначенном для моделирования пожара методом конечных объемов (рис. 3). В научных работах [12–18] авторами моделировались пожары на судах в помещениях различного функционального назначения, но в данных исследованиях применялись лишь справочные данные пожарной нагрузки.

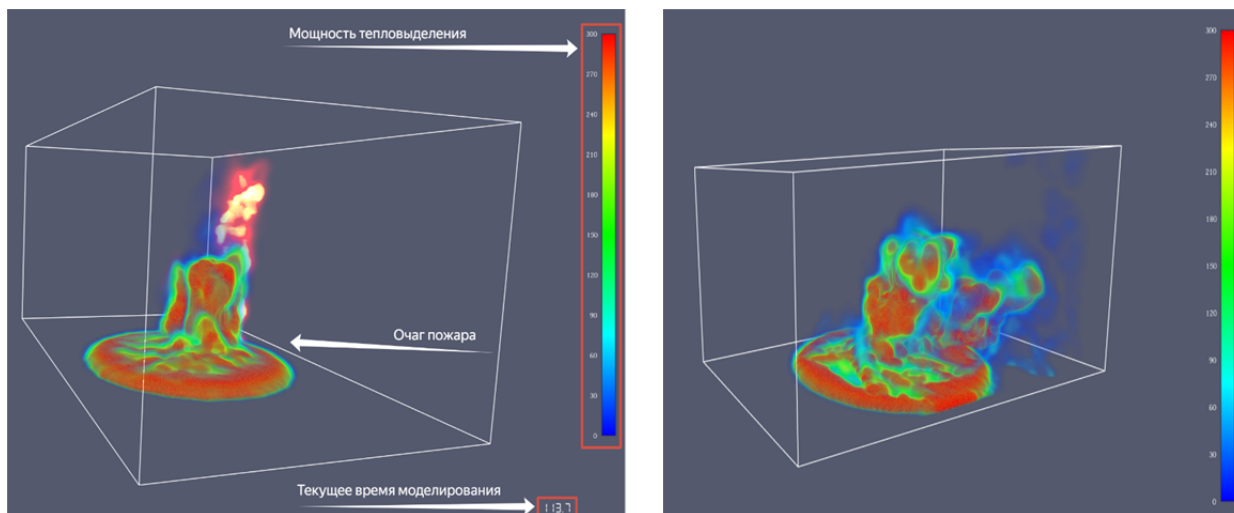


Рис. 2. Визуализация динамики МТВ в программе Smokeview

По замыслу моделирования пожар возник в результате короткого замыкания электрической проводки в одной из судовых кают верхней палубы, где находился член экипажа (агент). Задача агента заключалась в доставке огнетушителей в горящую каюту для ликвидации возгорания. Важным условием являлось, чтобы МТП огнетушителя на момент его доставки в горящее помещение превышала МТВ из зоны горения, поскольку это является одним из ключевых факторов для успешной ликвидации возгорания.

$$W_{\text{ТВ}}(\tau) < W_{\text{ТП}}, \quad (2)$$

где: $W_{\text{ТВ}}(\tau)$ – МТВ из зоны горения на момент доставки огнетушителя, кДж/с; $W_{\text{ТП}}$ – МТП фронта порошковой струи, кДж/с.

По результатам моделирования для представленной пожарной нагрузки в программном продукте Pyrosim были построены диаграммы изменения МТВ во времени (рис. 4).

В настоящей парадигме оценки эффективности огнетушителей МТП ($W_{\text{ТП}}$) возможно определить по МТВ ($W_{\text{ТВ}}$) из модельного очага пожара (заданного ранга), горение в котором ликвидирует данный типоразмер огнетушителя⁷:

$$q_{\text{оп}} = Q \cdot \omega \cdot S, \quad (3)$$

где: $q_{\text{оп}}$ – мощность теплопоглощения i -го типоразмера огнетушителя, кДж/с; Q – низшая теплота сгорания штабеля древесины, кДж/кг [19]; ω – удельная скорость выгорания, кг/м²с [19]; S – площадь поверхности модельного очага пожара⁷, м².

⁷ ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

Исходя из вышеизложенного, следует, что для успешной ликвидации возгорания необходимо выполнение условия, согласно формуле (2), то есть отбор тепла в единицу времени должен превышать выделение тепла из зоны горения.

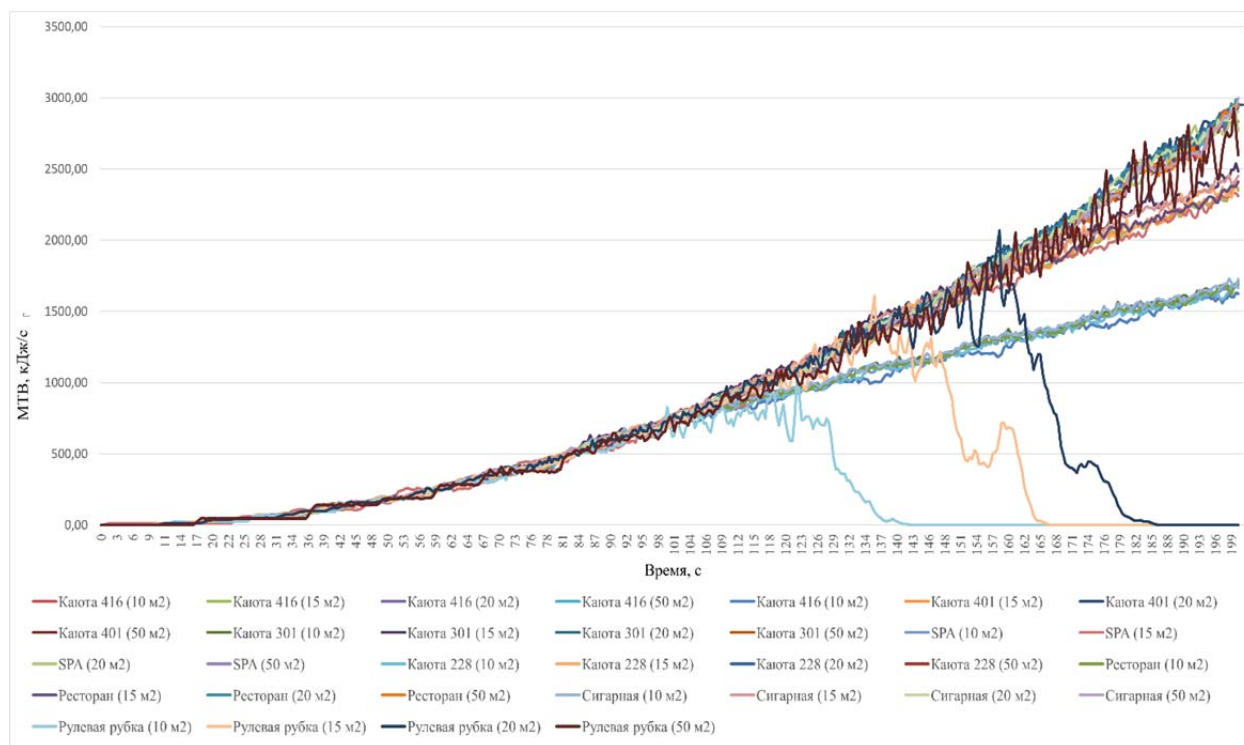


Рис. 3. Диаграмма МТВ помещений,
где применялись расчетные значения реакций горения

Таблица 3

Расчетная МТП огнетушителей

№ п/п	Типоразмер огнетушителя	Модельный очаг пожара класса «А»			Время действия огнетушителя, с
		Ранг	Площадь поверхности (S), м ²	МТП (q _{оп}), кДж/с	
1	ОП-1	0,5	2,37	474,23	6
2	ОП-2	0,7	3,55	710,35	6
3	ОП-3	1	4,70	940,47	8
4	ОП-4	2	9,36	1872,94	10
5	ОП-5				
6	ОП-6	3	13,89	2779,39	12
7	ОП-7				
8	ОП-8	4	18,66	3733,87	15
9	ОП-9				
10	ОП-10				

В табл. 3 представлена расчетная МТП (q_{оп}) переносных огнетушителей всех типоразмеров. Расчет МТП (q_{оп}) выполнен по формуле (3) для модельного очага пожара класса «А». Следует отметить, что некоторые типоразмеры (ОП-4/5, ОП-6/7, а также ОП-8/9/10) имеют одинаковые значения МТП, ранга, площади МОП и времени действия

огнетушителя (табл. 3). Это объясняется тем, что действующие нормативные документы⁸ предписывают для них единые требования к эффективности тушения МОП. Таким образом, с точки зрения теплофизической эффективности в рамках данной методики они являются эквивалентными, но не с точки зрения времени доставки, поскольку $\tau_{\text{общ}}$ для данных типоразмеров сильно варьируется, что доказывают экспериментальные данные времени доставки ПСП, представленные в [9–11].

Анализ экспериментальных данных численного моделирования (рис. 4) позволил установить интервал времени, до которого применение огнетушителя окажется эффективным, исходя из МТВ из зоны горения и расчетной МТП (табл. 3).

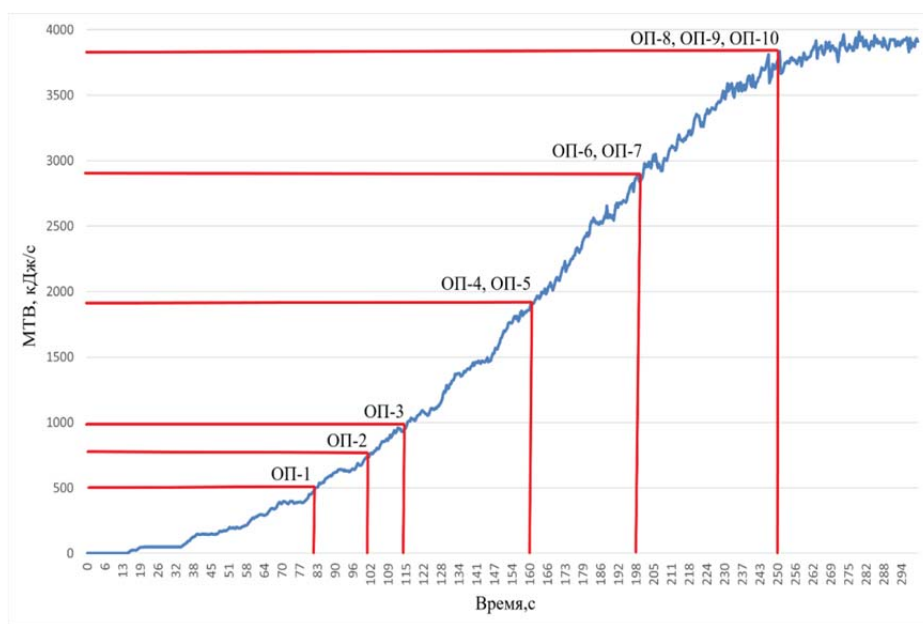


Рис. 4. Определение критического времени доставки огнетушителя по условию превышения МТП над МТВ

На рис. 5 представлена кривая роста МТВ ($W_{\text{ТВ}}$) при пожаре в судовой каюте площадью 20 м², время моделирования составляет 300 с. Горизонтальными линиями обозначена МТП ($q_{\text{оп}}$, табл. 3) огнетушителя каждого типоразмера. Эти линии являются константами для каждого типоразмера огнетушителя и отражают его максимальную МТП ($q_{\text{оп}}$), рассчитанную по формуле (3) для модельного очага пожара класса «А». Точка пересечения кривой роста МТВ ($W_{\text{ТВ}}$) и горизонтальной линии МТП ($q_{\text{оп}}$) определяет максимально допустимое время доставки ($\tau_{\text{кр}}$) и начала тушения для данного типоразмера огнетушителя в конкретном помещении.

Эффективность применения огнетушителя можно выразить в следующем виде:

$$\tau_{\text{общ}} < \tau_{\text{кр}}(W_{\text{ТП ОП}i}), \quad (4)$$

где: $\tau_{\text{общ}}$ – общее расчетное время доставки огнетушителя (1) к очагу пожара (с момента обнаружения до начала применения), полученное путем имитационного моделирования, с [11]; $\tau_{\text{кр}}(W_{\text{ТП ОП}i})$ – критическое время для данного типоразмера огнетушителя и конкретного помещения, с, определяемое как:

$$W_{\text{ТВ}}(\tau) \leq W_{\text{ТП ОП}i}.$$

⁸ ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

Соответственно, $W_{\text{ТВ}}(t)$ – МТВ из зоны горения на момент доставки огнетушителя, кДж/с (полученная путем численного моделирования); $W_{\text{ТП ОП}i}$ — константная МТП ($q_{\text{оп}}$) выбранного типоразмера огнетушителя, кДж/с (табл. 2).

Так, например, при пожаре в судовой каюте площадью 20 м^2 (рис. 5) необходимо доставить ОП-1 не позднее 82 с включительно ($\tau_{\text{общ}} \leq 82 \text{ с}$). Выполнение условия (4) означает, что огнетушитель способен поглотить больше тепла, чем выделяет очаг на момент начала тушения, что создает условия для успешной ликвидации пожара.

Если $\tau_{\text{общ}} \geq \tau_{\text{кр}}$ ($W_{\text{ТП ОП}i}$), то МТВ очага пожара превысит МТП огнетушителя. Применение данного типоразмера будет неэффективно, и пожар продолжит развиваться. Отсюда следует, что необходимо применять огнетушитель большего типоразмера, либо сократить расстояние до места расположения огнетушителя путем уменьшения показателя $\tau_{\text{общ}}$.

Анализ данных численного моделирования (рис. 4) позволил установить закономерность влияния площади помещения на рост МТВ во времени, которую следует учитывать при практическом применении данной методики.

Табл. 4 представляет сводные результаты численного моделирования, устанавливающие количественную взаимосвязь между тремя ключевыми параметрами разработанной методики: МТВ (для помещений площадью $10 \text{ м}^2, 15 \text{ м}^2, 20 \text{ м}^2, 50 \text{ м}^2$), МТП огнетушителей ($q_{\text{оп}}$) и критическим временем доставки огнетушителей $\tau_{\text{кр}}$.

Таблица 4

Критическое время доставки огнетушителей для кают различной площади

№ п/п	Типоразмер огнетушителя	МТВ ($W_{\text{ТВ}}(t)$), кДж/с				МТП ($q_{\text{оп}}$), кДж/с	$\tau_{\text{кр}}$, с
		Каюта 10 м^2	Каюта 15 м^2	Каюта 20 м^2	Каюта 50 м^2		
1	ОП-1	477,40	504,89	468,12	459,86	474,23	82
2	ОП-2	724,41	730,95	684,21	677,92	710,35	100
3	ОП-3	812,80	908,67	919,63	929,87	940,47	112
4	ОП-4/5	1247,71	1773,36	1857,40	1842,60	1872,94	160
5	ОП-6/7	1591,78	2275,86	2763,01	2884,94	2779,39	198
6	ОП-8/9/10	1931,99	2892,32	3701,28	4460,96	3733,87	249

Для наглядного примера произведен расчет по методике оснащения огнетушителями для судовой каюты площадью 20 м^2 . Для каждого типоразмера огнетушителя определено критическое время доставки ПСП $\tau_{\text{кр}}$. Из табл. 4 следует, что расстановка огнетушителей по данной методике для судовой каюты площадью помещения 20 м^2 обеспечивает пожарную безопасность в случае возгорания, поскольку выполнены условия неравенства (2) и (4). Стоит отметить, что для судовых кают $10, 15$ и 50 м^2 расстановка огнетушителей, как для каюты 20 м^2 , не обеспечит эффективное пожаротушение, так как $\text{МТВ} \geq \text{МТП}$ огнетушителя на момент его доставки. В каютах, площадь которых составляет 10 и 15 м^2 , а также при высоте потолка 3 м , общий объем воздуха меньше, чем в каютах 20 и 50 м^2 , соответственно, скорость роста температуры выше. Концентрация продуктов горения в малом объеме растет быстрее, что приводит к ускоренному нагреву всех поверхностей в помещении, включая предметы, которые еще не воспламенились. Быстрый прогрев пожарной нагрузки увеличивает вероятность более раннего воспламенения других предметов и перехода пожара в стадию объемного горения, что сопровождается скачком МТВ. В замкнутом малом объеме

лучистая энергия от пламени и горячих газов гораздо эффективнее воздействует на все горючие поверхности, ускоряя процесс пиролиза и последующего горения. По мере развития пожара (после 160 с, табл. 4) влияние площади помещения становится более выраженным. В больших помещениях при прочих равных условиях МТВ в итоге достигает более высоких пиковых значений, так как в них содержится больше горючих материалов и они могут обеспечить больший приток воздуха. Разница МТВ в помещениях 15 м² и 50 м² на 100 с составляет всего 6 %, через 60 с разница составляет 32 %, еще через 40 с разница – 45 % и на 249 с (спустя еще 50 с) МТВ в судовой каюте площадью 50 м² превышает на 56 % в сравнении с каютой 15 м². После 249 с применение ручных огнетушителей (даже ОП-10) нецелесообразно, поскольку МТВ развившегося пожара будет существенно превышать МТП огнетушителя, в данном случае ликвидация пожара будет осуществляться ручными пожарными стволами от пожарных кранов.

Таким образом, быстрый рост МТВ в малых помещениях на ранней стадии – это физически закономерное явление, как и резкий рост МТВ в помещениях большей площади после 160 с, которое необходимо учитывать для точного расчета критического времени $\tau_{кр}$ и эффективного размещения огнетушителей на объектах защиты. Это еще раз подтверждает, что нормативный подход, учитывающий только площадь защищаемого помещения ПСП, недостаточен и требует доработки.

Предложенное неравенство (4) позволяет на этапе проектирования определить, обеспечивают ли выбранные места размещения и типоразмер огнетушителя успешную ликвидацию возгорания для конкретного объекта защиты. Настоящая методика позволяет перейти от стандартного подхода (оснащение ПСП по площади) к динамическому планированию оснащения объекта ПСП, что существенно повышает вероятность успешной ликвидации пожара на начальной стадии (рис. 6).

Научная новизна данной методики заключается в отказе от стандартного подхода оснащения объектов защиты ПСП в пользу динамической физико-математической модели. Данная методика впервые напрямую связывает три ключевых фактора:

1. Антропометрический и эргономический фактор ($\tau_{общ}$) – моделирование реальной скорости движения человека с отягощением [9–11].
2. Моделирование динамики развития МТВ ($W_{ТВ}(\tau)$) – учет конкретной пожарной нагрузки, а не справочных данных.
3. Фактор оценки эффективности применения огнетушителя ($W_{тп}$) не по массе заряда, а по его теплофизической характеристике – способности поглощать энергию из зоны горения.

Заключение

Проведённое исследование позволило разработать научно обоснованную методику применения огнетушителей при тушении пожаров на объектах водного транспорта. В настоящем исследовании автор предлагает оснащать объекты защиты, основываясь не только на нормативных требованиях, но и применять динамическую расчетно-экспериментальную модель конкретного объекта. В основу методики входят расчетно-экспериментальные коэффициенты, применяемые в программных продуктах, определяющие время доставки каждого типоразмера огнетушителя. Также предлагается использовать не нормативную (типовую), а реальную пожарную нагрузку для каждого помещения объекта, которая будет определять МТВ из зоны горения и использовать теплофизическую эффективность огнетушителей.

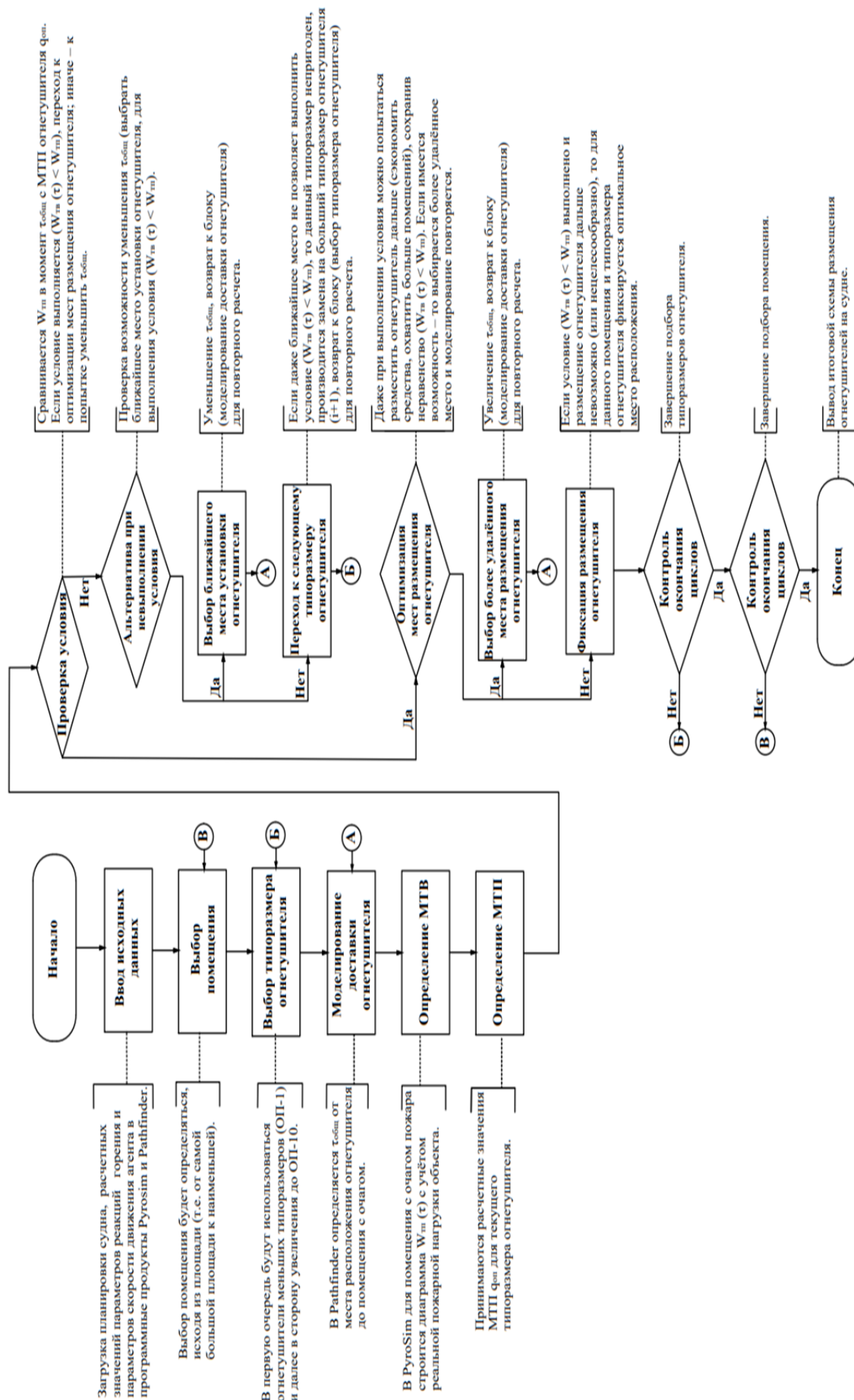


Рис. 5. Алгоритм методики оснащения объектов огнетушителями

Настоящая методика позволит:

– обоснованно оптимизировать размещение ПСП на строящихся и эксплуатируемых судах. Это позволит не просто выполнить нормы оснащения, а гарантировать эффективность применения огнетушителей, возможно, даже сократив общее количество единиц ПСП за счет их рационального размещения и правильного подбора типоразмеров;

– повысить вероятность успешной ликвидации пожара на начальной стадии экипажем за счёт сокращения времени доставки и обеспечения достаточного количества огнетушителей на объекте;

– внести изменения в действующие нормативные документы (правила Российского морского регистра судоходства, Российского классификационного общества), предъявляющие требования к первичным средствам пожаротушения на судах. Результаты работы являются готовым научно-техническим обоснованием для совершенствования действующих правил. Предлагается дополнить или пересмотреть главы, касающиеся первичных средств пожаротушения, введя требования к учету:

1. Времени доставки на основе моделирования.

2. Реальной (паспортной) пожарной нагрузки помещений.

3. Необходимости соответствия МТП огнетушителя расчетной МТВ помещения в максимально допустимое время доставки.

Таким образом, реализация предложенной методики оснащения судов огнетушителями позволит существенно повысить уровень пожарной безопасности, минимизировать материальные и экологические последствия, а также снизить угрозу для жизни и здоровья людей. Данная методика применима не только для объектов водного транспорта, но и для транспортной инфраструктуры.

Список источников

1. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Оценка эффективности применения огнетушителей на водном транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 8–20. EDN HGIURY.

2. Анализ нормативных требований к огнетушителям, размещаемым на судах / Д.Ф. Кожевин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-1 (61). С. 170–178.

3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года SOLAS 74. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675> (дата обращения: 10.02.2026).

4. Российский Морской Регистр Судоходства «Правила классификации и постройки морских судов, часть VI Противопожарная защита». URL: <https://rfclass.ru> (дата обращения: 10.02.2026).

5. Российское Классификационное Общество «Правила классификации и постройки судов, часть III Противопожарная защита». URL: <https://rfclass.ru> (дата обращения: 10.02.2026).

6. Кожевин Д.Ф. Концепция перспективного развития первичных средств порошкового пожаротушения // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 7 (259). С. 44–50. EDN ZDKCDW.

7. Абдурагимов И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 60–82. EDN OZZUSH.

8. Кожевин Д.Ф. Обоснование механизма огнетушащего действия порошка на основании анализа его фракционного состава в нестационарном газопорошковым потоке // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189

9. Кожевин Д.Ф., Естехин В.Г. Определение параметров движения людей при доставке огнетушителей к очагу пожара на объектах водного транспорта // Пожарная безопасность. 2025. № 1 (118). С. 39–49. EDN DZESQM. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2025.118.1.003

10. Естехин В.Г. Влияние способа транспортировки на скорость доставки огнетушителей к месту пожара на судах // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 35–45.
11. Кожевин Д. Ф., Естехин В. Г. Моделирование движения людей с отягощением в виде огнетушителя на объектах транспортной инфраструктуры // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2025. № 3. С. 48–57. DOI:10.25257/FE.2025.3.48-57
12. The Mathematical Model Based on the Parameters of Simulation Results Predicts the Fire Extinguishing Resource Demand of Naval Fires / Guo Jingjing [et al.] // Journal of Applied Sciences, Appl. Sci. 2024. № 14 (21). DOI: 10.3390/app142110038
13. Yuechao Zhao, Dihao Ai Numerical Simulation Study on the Response of Ship Engine Room Structure Under Fire Based on Thermo-Mechanical Coupling Model // Fire. 2024. № 7 (12). P. 480. DOI: 10.3390/fire7120480
14. Ioanna A. Koromila, Kostas J. Spyrou Design Fire Methodology for Vehicle Spaces Onboard Ships // Journal Fire Technology. 2023. № 59. P. 1725–1759.
15. Research on the Risk Classification of Cruise Ship Fires Based on an Attention-Bp Neural Network / X. Zhenghua [et al.] // Polish Maritime Research. № 29 (3) P. 61–68. DOI: 10.2478/pomr-2022-0026
16. Han Zhang. Numerical simulation of fire Incidents in ship compartments // Frontiers in Science and Engineering. № 3 (8). P. 53–59. DOI: 10.54691/fse.v3i8.5527
17. Jian He Zhao, Ye Gao, Hong Mei Wu Numerical simulation and research of pool fire suppressed by water mist in the engine room of a ship // Applied Mechanics and Materials. № 29–32. P. 651–657. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.651
18. Tolga Ayc, Barış Barlas, Aykut Ölçer. Fire safety analysis onboard passenger ships by using fire dynamics simulations: case study of a Turkish domestic passenger ship // Journal of ETA maritime science. 2024. № 2. P. 224–236. DOI: 10.4274/JEMS.2024.56514
19. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. 119 с.

References

1. Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Ocenka effektivnosti primeneniya ognetushitelej na vodnom transporte // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 8–20. EDN HGIURY.
2. Analiz normativnyh trebovanij k ognetushitelyam, razmeshchaemym na sudah / D.F. Kozhevin [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 3-1 (61). S. 170–178.
3. Mezhdunarodnaya Konvenciya po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda SOLAS 74. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765675> (data obrashcheniya: 10.02.2026).
4. Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva «Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov, chast' VI Protivopozharnaya zashchita». URL: <https://rfclass.ru> (data obrashcheniya: 10.02.2026).
5. Rossijskoe Klassifikacionnoe Obschestvo «Pravila klassifikacii i postrojki sudov, chast' III Protivopozharnaya zashchita». URL: <https://rfclass.ru> (data obrashcheniya: 10.02.2026).
6. Kozhevin D.F. Konceptiya perspektivnogo razvitiya pervichnyh sredstv poroshkovogo pozharotusheniya // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2022. № 7 (259). S. 44–50. EDN ZDKCDW.
7. Abduragimov I.M. O mekhanizmah ognetushashchego dejstviya sredstv pozharotusheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. T. 21. № 4. S. 60–82. EDN OZZUSH.
8. Kozhevin D.F. Obosnovanie mekhanizma ognetushashchego dejstviya poroshka na osnovanii analiza ego frakcionnogo sostava v nestacionarnom gazoporoshkovom potoke // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189
9. Kozhevin D.F., Estekhin V.G. Opredelenie parametrov dvizheniya lyudej pri dostavke ognetushitelej k ochagu pozhara na ob"ektah vodnogo transporta // Pozharnaya bezopasnost'. 2025. № 1 (118). S. 39–49. EDN DZESQM. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2025.118.1.003

10. Estekhin V.G. Vliyanie sposoba transportirovki na skorost' dostavki ognetushitelej k mestu pozhara na sudah // *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2025. № 1 (54). S. 35–45.
11. Kozhevnikov D. F., Estekhin V. G. Modelirovanie dvizheniya lyudej s otyagoshcheniem v vide ognetushitelya na ob"ektah transportnoj infrastruktury // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie, likvidaciya*. 2025. № 3. S. 48–57. DOI:10.25257/FE.2025.3.48-57
12. The Mathematical Model Based on the Parameters of Simulation Results Predicts the Fire Extinguishing Resource Demand of Naval Fires / Guo Jingjing [et al.] // *Journal of Applied Sciences, Appl. Sci.* 2024. № 14 (21). DOI: 10.3390/app142110038
13. Yuechao Zhao, Dihao Ai Numerical Simulation Study on the Response of Ship Engine Room Structure Under Fire Based on Thermo-Mechanical Coupling Model // *Fire*. 2024. № 7 (12). P. 480. DOI: 10.3390/fire7120480
14. Ioanna A. Koromila, Kostas J. Spyrou Design Fire Methodology for Vehicle Spaces Onboard Ships // *Journal Fire Technology*. 2023. № 59. P. 1725–1759.
15. Research on the Risk Classification of Cruise Ship Fires Based on an Attention-Bp Neural Network / X. Zhenghua [et al.] // *Polish Maritime Research*. № 29 (3) P. 61–68. DOI: 10.2478/pomr-2022-0026
16. Han Zhang. Numerical simulation of fire Incidents in ship compartments // *Frontiers in Science and Engineering*. № 3 (8). P. 53–59. DOI: 10.54691/fse.v3i8.5527
17. Jian He Zhao, Ye Gao, Hong Mei Wu Numerical simulation and research of pool fire suppressed by water mist in the engine room of a ship // *Applied Mechanics and Materials*. № 29–32. P. 651–657. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.651
18. Tolga Ayc, Barış Barlas, Aykut Ölçer. Fire safety analysis onboard passenger ships by using fire dynamics simulations: case study of a Turkish domestic passenger ship // *Journal of ETA maritime science*. 2024. № 2. P. 224–236. DOI: 10.4274/JEMS.2024.56514
19. Prognozirovanie opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii: ucheb. posobie / Yu.A. Koshmarov [i dr.]. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2000. 119 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 16.03.2026; одобрена после рецензирования: 17.04.2026; принята к публикации: 21.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 16.03.2026; approved after review: 17.04.2026; accepted for publication: 21.04.2026

Информация об авторах:

Естехин Виталий Геннадьевич, заместитель начальника факультета инженерно-технического Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149), e-mail: estekhin@inbox.ru, SPIN-код: 2770-8682

Information about authors:

Estekhin Vitalii G., deputy head of the faculty of engineering and technical of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: estekhin@inbox.ru, SPIN: 2770-8682

Научная статья

УДК 614.841.343; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

ВЛИЯНИЕ АСТРАЛЕНОВ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА

✉ **Пылаева Елизавета Андреевна.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ elizavetapylaeva2001@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния углеродных наноструктур (астраленов) на прочностные и термостойкие характеристики бетона в условиях воздействия углеводородного пожара. Актуальность исследования обусловлена высокой аварийной опасностью объектов нефтегазового комплекса, где основным фактором разрушения строительных конструкций является быстрая потеря несущей способности бетона при интенсивном тепловом воздействии.

Целью работы являлась экспериментальная оценка эффективности наномодифицирования цементной матрицы астраленами для повышения остаточной прочности бетона при нагреве. В качестве объектов исследования использовались контрольные и наномодифицированные бетонные образцы. Модифицирование проводилось путем добавления астраленов в водную фазу с последующей ультразвуковой обработкой для обеспечения равномерного распределения частиц. Прочность на сжатие определялась после нагрева по углеводородной кривой в муфельной печи. Распределение астраленов подтверждено методом атомно-силовой микроскопии.

Установлено, что введение астраленов в концентрации 0,2 об. % обеспечивает увеличение остаточной прочности бетона по сравнению с контрольными образцами. Полученный эффект объясняется уплотнением микроструктуры цементной матрицы, снижением пористости и повышением трещиностойкости при термическом воздействии.

Ключевые слова: бетон, астралены, огнестойкость, углеводородный пожар, остаточная прочность

Для цитирования: Пылаева Е.А. Влияние астраленов на огнестойкость и прочностные характеристики бетона в условиях углеводородного пожара // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 161–170. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

Scientific article

THE EFFECT OF ASTRALENES ON THE FIRE RESISTANCE AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF CONCRETE IN A HYDROCARBON FIRE

✉ **Pylaeva Elizaveta A.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ elizavetapylaeva2001@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of carbon nanostructures (astralenes) on the strength and heat-resistant characteristics of concrete under the influence of a hydrocarbon fire. The relevance of the study is due to the high emergency risk of oil and gas facilities, where the main factor in the destruction of building structures is the rapid loss of bearing capacity of concrete under intense heat exposure.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

The aim of the work was to experimentally evaluate the effectiveness of nanomodification of the cement matrix with astralenes to increase the residual strength of concrete during heating. Control and nanomodified concrete samples were used as research objects. The modification was carried out by adding astralenes to the aqueous phase, followed by ultrasonic treatment to ensure uniform particle distribution. Compressive strength was determined after heating using a hydrocarbon curve in a muffle furnace. The distribution of astralenes was confirmed by atomic force microscopy.

It was found that the introduction of astralenes at a concentration of 0.2 vol. % provides an increase in the residual strength of concrete compared with control samples. The effect obtained is explained by the compaction of the microstructure of the cement matrix, a decrease in porosity and an increase in crack resistance under thermal influence.

Keywords: concrete, astralenes, fire resistance, hydrocarbon fire, residual strength

For citation: Pylaeva E.A. The effect of astralenes on the fire resistance and strength characteristics of concrete in a hydrocarbon fire // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 161–170. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

Введение

Объекты нефтегазового комплекса характеризуются повышенной пожарной опасностью вследствие хранения и транспортировки значительных объемов горючих жидкостей и газов под давлением. Углеводородные пожары отличаются экстремально быстрым ростом температуры до 1100–1200 °С в первые 5–10 мин., воздействием пламени высокой интенсивностью теплового излучения и значительным массовым расходом горючего на стадии факельного горения [1]. Эти факторы приводят к стремительной потере несущей способности строительных конструкций, в первую очередь железобетонных, что многократно увеличивает масштабы аварий, экологический ущерб и риск для персонала [2].

Для объектов нефтегазового комплекса более актуальным является режим углеводородного пожара, характеризующийся более жестким тепловым ударом [3].

В последние годы активно развивается направление наномодифицирования цементной матрицы и полимерных матриц углеродными нанотрубками, фуллеренами, астраленами [4]. Введение таких структур позволяет снижать пористость цементного камня, повышать адгезию на границе фаз, увеличивать трещиностойкость и остаточную прочность после высокотемпературного воздействия [5].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых наномодифицированным бетонам, ряд аспектов применения астраленов для повышения огнестойкости остается недостаточно изученным. Отсутствуют систематизированные данные об оптимальных концентрациях модификатора и результатах сравнительных огневых испытаний в углеводородном пожаре [6, 7].

Цель исследования – разработка и экспериментальное обоснование технологии модифицирования цементной матрицы астраленами для повышения огнестойкости строительных конструкций в условиях углеводородного пожара.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- анализ особенностей воздействия углеводородного пожара на железобетонные конструкции и обзор существующих способов повышения их огнестойкости;
- экспериментальное определение влияния модифицирования астраленами (в концентрации 0,2 об. %) на прочностные характеристики бетона при нагреве до 500 °С.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили две серии образцов:

- контрольные кубические образцы бетона размеров 70×70×70 мм, изготовленные по стандартной рецептуре тяжелого бетона класса В25 (без модифицирования);
- наномодифицированные кубические образцы того же состава с введением астраленов в водную фазу затворения.

Астралены представляют собой многослойные фуллероидные углеродные наноструктуры размером 80–150 нм, полученные методом каталитического пиролиза углеводородов [8]. Модифицирование дистиллированной воды проводилось путем депонирования углеродных наноконструктов с последующей ультразвуковой обработкой на установке с частотой 60 кГц в течение 30 мин. Такой подход позволяет равномерно распределить нано структуры в объеме жидкости и предотвратить их агломерацию [9].

Для изготовления экспериментальных образцов применялся бетон класса В25. Контрольная (немодифицированная) смесь включала портландцемент, крупный заполнитель (габбро-диабаз) и воду. При приготовлении наномодифицированных образцов в состав бетонной смеси дополнительно вводились активный аморфный микрокремнезем, базальтовая микрофибра, а также комплексный модификатор на основе суперпластификаторов [10] и углеродных наноструктур (астраленов).

Введение астраленов осуществлялось через водную фазу после ультразвукового диспергирования. Образцы твердели 28 суток в нормальных условиях (температура 20 ± 2 °С, влажность 95–100 %). Бетонные смеси готовили согласно ГОСТ 25192–2012 и ГОСТ 10180–2012 [11].

Для оценки распределения астраленов в водной фазе использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследование проводилось на установке «NTEGRA Spectra» в полуконтактном режиме. Образцы модифицированной дистиллированной воды (с концентрацией астраленов 0,2 об. %) наносились на слюдяную подложку, после испарения воды проводился анализ твердого остатка.

Прочность при сжатии определяли на гидравлическом прессе с маслостанцией согласно ГОСТ 10180–2012. Скорость нагружения $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. Испытывали серии по 3–6 образцов для каждой группы (контрольные, модифицированные).

Оценку поведения в условиях углеводородного пожара проводили путем нагрева образцов в муфельной печи с программным ПИД-регулятором «ОВЕН ТРМ251». Температурный режим соответствовал кривой углеводородного пожара по ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы: быстрый подъем до 1 100 °С в первые 5–10 мин с последующим выдерживанием [10]. Образцы испытывали при температурах 300 °С, 400 °С и 500 °С с временем выдержки, имитирующим 10–30 мин пожара. После охлаждения определялась остаточная прочность при сжатии. Плотность образцов измерялась гидростатическим методом по ГОСТ 12730.1–78. Бетоны. Методы определения плотности.

Результаты обрабатывали методами математической статистики (рассчитывалось среднее арифметическое, стандартное отклонение, доверительный интервал при $p = 0,95$). Различия считали значимыми при $p < 0,05$ (по t-критерию Стьюдента).

Результаты исследования и их обсуждение

На АСМ-скане слюдяной подложки изображен твердый остаток после испарения дистиллированной воды с астраленами (рисунок).

Топология (а) характеризуется упорядоченной структурой с анизотропным периодическим рельефом. Средний латеральный размер структурных элементов составляет $1,8 \pm 0,2$ мкм при среднем расстоянии между ними $2,5 \pm 0,3$ мкм. Диапазон размеров элементов варьируется от 1,5 до 2,1 мкм. Среднеквадратичная шероховатость поверхности $R_q = 35 \pm 5$ нм, максимальный перепад высоты достигает 120 нм.

Топология (б) характеризуется статистически неоднородным островковым рельефом с изотропным распределением зёрен. Средний размер зёрен составляет $0,90 \pm 0,15$ мкм с модальным значением 0,8 мкм, размеры отдельных зерен находятся в пределах от 0,4 до 1,5 мкм. Среднее расстояние между центрами зёрен – $1,2 \pm 0,2$ мкм, поверхностная плотность – 8,5 шт./мкм². Среднеквадратичная шероховатость поверхности $R_q = 78 \pm 10$ нм, максимальный перепад высоты достигает 210 нм.

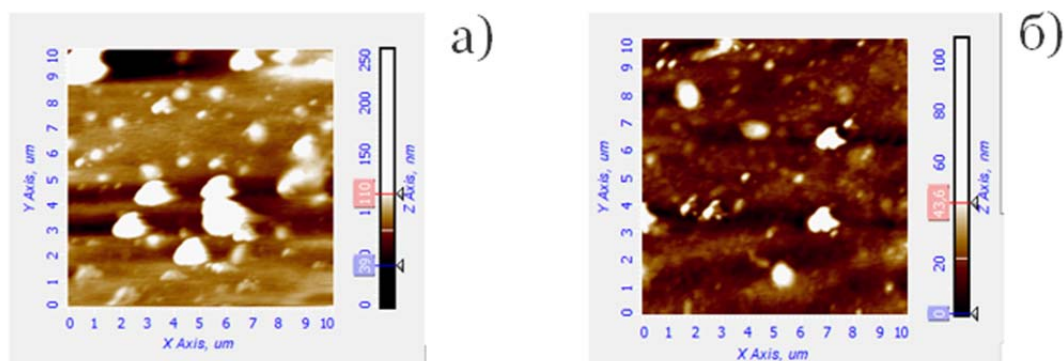


Рис. АСМ-сканы твердого остатка на слюдяной подложке (контрольный образец (а), модифицированный образец (б))

Для образца (а) с упорядоченной кристаллической структурой измеренные значения твёрдости и модуля Юнга составляют $4,8 \pm 0,3$ ГПа и 125 ± 7 ГПа соответственно. Для образца (б), имеющего островковую морфологию, определены твёрдость $2,9 \pm 0,4$ ГПа и модуль Юнга 94 ± 9 ГПа.

Упорядоченная микроструктура образца (а) приводит к значительному повышению твердости на 65 % и модуля Юнга на 33 % по сравнению с островковой структурой (б). Регулярное распределение структурных элементов способствует равномерному распределению нагрузки, в то время как наличие границ между зернами и микроконцентраторами напряжений в островковой структуре (б) снижает прочностные характеристики материала.

Анализ данных показывает, что наноструктуры размером 80–150 нм распределены по подложке равномерно, без значительной агломерации (рисунок). Это подтверждает эффективность ультразвуковой обработки для получения стабильной суспензии астраленов.

Сводные данные оценки поведения образцов в условиях углеводородного пожара приведены в таблице.

Таблица

Абсолютные и относительные изменения прочности бетона при нагреве по углеводородной и температурной кривой

Температура нагрева, °С	Вид бетона	Прочность без нагрева σ_0 , МПа	Остаточная прочность σ_r , МПа	Абсолютное изменение по сравнению с контролем $\Delta\sigma$, МПа	Относительное изменение, %	Потеря прочности относительно σ_0 , %
Без нагрева	Контрольный	41,1	41,1	-	-	0
	Наномодифицированный	60,2	60,2	+19,1	+46	0
300	Контрольный	41,1	36,3	-	-	11,7
	Наномодифицированный	60,2	55,7	+19,4	+37	7,5
400	Контрольный	41,1	31,4	-	-	23,6
	Наномодифицированный	60,2	50,8	+19,4	+38	15,6
500	Контрольный	41,1	28,9	-	-	29,7
	Наномодифицированный	60,2	48,8	+19,9	+40	18,9

Применённые методы частично основаны на стандартных процедурах (ГОСТ 10180–2012, ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014) с модифицированием: введение астраленов через ультразвуковое диспергирование и нагрев по углеводородной кривой вместо стандартной целлюлозной.

Полученные экспериментальные данные подтверждают положительное влияние модифицированных астраленов на структуру и эксплуатационные характеристики бетона в условиях высокотемпературного воздействия, имитирующего углеводородный пожар [12].

Плотность модифицированных образцов снизилась на 4–6 % по сравнению с контрольными. Прочность модифицированных образцов на сжатие без нагрева возросла на 36 % по сравнению с контрольными. Это говорит о заметном улучшении механических свойств материала благодаря введению астралена [13].

Когда образцы нагревались в муфельной печи по режиму, соответствующему углеводородному пожару (ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014), различия стали еще более выраженными. Уже при 300 °С остаточная прочность модифицированных образцов оказалась на 19,4 % выше контрольных. Таким образом, модифицированный бетон значительно лучше сохраняет несущую способность при высоких температурах [14].

Контрольные образцы уже при 500 °С теряли до 25–30 % исходной прочности [15]. В температурном диапазоне 400–600 °С происходит активная дегидратацией С-S-H геля и начинается интенсивное растрескивание цементного камня [16].

Введение астраленов заметно изменило поведение материала. Потеря прочности у модифицированных образцов заметно медленнее. Астралены создают барьерный эффект, который препятствуя миграции влаги и газов, что снижает вероятность термического растрескивания. Кроме того, на микроуровне повышается трещиностойкость и, вероятно, формируются более термостабильные гидросиликатные фазы [17]. В результате модифицированные образцы проявляются значительно лучшую устойчивость к высоким температурам [18].

Полученные данные хорошо согласуются с работами по модифицированию бетона углеродными нанотрубками (УНТ). Исследования прочности после нагрева до 600–800 °С показывают прирост остаточной на 20–50 % при введении УНТ в концентрациях 0,01–0,5 масс. %. В данной работе астралены (0,2 об. % в воде) дают сопоставимый или даже лучший эффект при более низкой концентрации, что может быть связано с их многослойной фуллероидной структурой и лучшей термостабильностью по сравнению с одностенными УНТ [19].

Степень сохранения прочности возрастает с увеличением температуры воздействия, а максимальный прирост наблюдается при 500 °С (40 %). Это указывает на то, что наноармирование наиболее эффективно именно в зоне интенсивной деградации цементного камня (400–600 °С). Достоверность результатов подтверждается: сериями по 3–6 образцов на точку, статистической обработкой ($p < 0,05$) и воспроизводимостью в параллельных сериях (± 5 –7 %).

Снижение плотности модифицированных образцов, вероятно, связано с оптимизацией поровой структуры цементного камня за счёт наноармирования. Увеличение прочности на 36 % объясняется заполнением микропор и микротрещин наноструктурами, повышением адгезии на границе «цементная матрица – наполнитель» и эффектом мостикового армирования [20].

Полученные в работе экспериментальные данные демонстрируют чёткую корреляцию между морфологией цементной матрицы, модифицированной астраленами, и её прочностными характеристиками как в нормальных условиях, так и после высокотемпературного воздействия. Сопоставление результатов атомно-силовой микроскопии (рисунок) и механических испытаний (таблица) позволяет выявить физико-химические механизмы, обуславливающие повышение огнестойкости наномодифицированного бетона.

АСМ-исследование твёрдого остатка модифицированной водной фазы (рисунок б) подтвердило, что ультразвуковая обработка обеспечивает эффективное диспергирование

астраленов: наноструктуры размером 80–150 нм равномерно распределены по подложке, агломераты отсутствуют. Формируется статистически неоднородный островковый рельеф. Средний размер зёрен составляет $0,90 \pm 0,15$ мкм при поверхностной плотности 8,5 шт./мкм².

Именно такая равномерность распределения наночастиц и стала главным фактором, который обеспечил прирост прочности на сжатие в нормальных условиях на 36 % (с 41,1 МПа у контрольных образцов до 60,2 МПа у модифицированных). Астралены, равномерно распределяясь по всему объёму цементной матрицы, одновременно работают и как центры кристаллизации гидратных фаз, и как армирующие элементы на наноуровне [21]. Они проникают в поры и микротрещины, заметно улучшая сцепление на границах фаз и создают структуры, которые эффективно препятствуют появлению и развитию дефектов под нагрузкой.

В отличие от них, контрольный образец (рисунок) показывает более упорядоченную, но менее плотную структуру с элементами размером $1,8 \pm 0,2$ мкм, что снижает его прочность.

Наиболее заметные различия проявляются при испытаниях на устойчивость к высокотемпературным воздействиям, имитирующим углеводородный пожар (таблица). Модифицированные образцы демонстрируют значительно большую устойчивость к нагреву: при 300 °С их прочность на 37 % выше, при 400 °С на 38 %, а при 500 °С на 40 % по сравнению с контрольными.

Эта особенность связана с уникальной модифицированной структурой, выявленной с помощью атомно-силовой микроскопии. Шероховатостная поверхность с развитой текстурой ($R_q = 78 \pm 10$ нм) и плотностью наночастиц обеспечивает термозащитные свойства.

Равномерное распределение наночастиц, обладающих высокой термостойкостью, создает пространственную сетку, которая препятствует диффузии водяных паров и продуктов термического разложения цементного камня при повышении температуры. Это снижает внутреннее паровое давление и предотвращает интенсивное растрескивание материала. Контрольный образец с упорядоченной структурой (рисунок а) не имеет такого барьера, что приводит к более быстрой потере влаги и образованию магистральных трещин.

Основная потеря прочности бетона в диапазоне 400–600 °С связана с разложением основных носителей прочности – гидросиликатов кальция (C-S-H геля). Наличие равномерно распределённых наноструктур способствует формированию более плотной и термически стабильной упаковки гидратных фаз уже на стадии твердения. Это замедляет кинетику их дегидратации при нагреве.

Астралены, фиксируемые АСМ как отдельные островки, в объёме материала работают как микроарматура, соединяющая стенки пор и трещин. При термическом напряжении эта арматура удерживает структуру от разрушения, что подтверждается меньшей потерей прочности модифицированных образцов (18,9 % против 29,7 % при 500 °С).

Таким образом, устанавливается прямая корреляционная связь, высокая однородность распределения и развитая удельная поверхность (островковый рельеф по данным АСМ) приводит к повышению прочности в нормальных условиях на 36 % (за счёт уплотнения структуры и наноармирования). Высокая плотность упаковки наноструктур и барьерный эффект приводит к повышению остаточной прочности после нагрева до 500 °С на 40 % (за счёт снижения парового давления и замедления термодеструкции).

Снижение плотности модифицированных образцов на 4–6 % при одновременном росте прочности также объясняется оптимизацией поровой структуры: наночастицы, заполняя дефекты, не утяжеляют материал, а делают его более организованным и устойчивым к внешним воздействиям [22].

Полученные данные позволяют рекомендовать технологию модифицирования астраленами для повышения огнестойкости железобетонных конструкций на объектах повышенной пожарной опасности.

Заключение

Проведённое исследование показало, что астралены перспективны в качестве наномодификатора, позволяющего одновременного повысить огнестойкость цементной матрицы и композитной арматуры в условиях углеводородного пожара – самого опасного сценария для объектов нефтегазового комплекса [23].

Анализ особенностей воздействия углеводородного пожара подтвердил, что традиционные методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций в условиях экстремально быстрого нагрева (до 1100–1200 °С уже в первые минуты) работают недостаточно эффективно [24, 25]. Это и определяет актуальность поиска новых решений, в частности, наномодифицирования цементной матрицы углеродными структурами.

Экспериментально установлено, что введение астраленов в концентрации 0,2 об. % обеспечивает равномерное распределение наноструктур размером 80–150 нм по всему объёму бетона. При этом прочность на сжатии в нормальных условиях возрастает на 36 % (до 60,2 МПа), а плотность материала снижается на 4–6 %. При нагреве до 500 °С по режиму углеводородного пожара остаточная прочность модифицированных образцов на 37–40 % выше, чем у контрольных: потеря прочности составляет 18,9 % против 29,7 %. Полученные данные подтверждают эффективность применения астраленов для повышения огнестойкости бетона.

Список источников

1. Дашко Л.В. Методы исследования бетонных конструкций после взрыва и последующего пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 193–203.
2. Лукьянов Д.Е. Пожарная безопасность в процессе переработки нефтегазовых продуктов: современные вызовы и решения // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 4 (85). С. 908–914.
3. Аблаева У.Ш., Досалиев К.С., Абдужалилов Х.Б. Прочность и огнестойкость железобетонных конструкций // Экономика и социум. 2025. № 4-2 (131). С. 112–117.
4. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение / М.М. Томишко [и др.] // Российский химический журнал. 2008. № 5. С. 3–11.
5. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 25–33.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. Т. 5. № 1. С. 24–38.
7. Ясинская Е.В., Никулин Н.М., Кривцов Е.Е. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 29–32.
8. Астралены – углеродные наномодификаторы фуллероидного типа / А.И. Пономарев [и др.] // Труды междунар. конф. ТПКММ. Москва, 2003 г. С. 147–152.
9. Исследование динамической прочности и жесткости изделий из мелкозернистого бетона, модифицированного наноструктурным шунгитовым наполнителем / Г.Э. Шаблинский [и др.] // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 231–236.
10. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций / О.Л. Ташлыков [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 2 (15). С. 49–55.
11. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. 5-е изд. М.: Издательство АСВ, 2011. 528 с.
12. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

13. Кирсанова А.А. Нанотехнологии в строительстве. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. 47 с.
14. Плотников Д.А., Башева Т.С. Огнестойкость железобетонных конструкций из вторичного сырья // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2017. № 3 (54). С. 57–65.
15. Матвеева Е.Г. Повышение эффективности бетона добавкой нанодисперсного кремнезема: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2011. 196 с.
16. Исследование возможности модификации карбоксилатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей / С.С. Киски [и др.] // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 42–46.
17. Huseien G.F. A Review on Concrete Composites Modified with Nanoparticles // Journal of Composites Science. 2023. № 2. Article 67. DOI: 10.3390/jcs7020067
18. Мелкозернистые модифицированные фибробетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина [и др.] // VII Ежегод. конф. Нанотехнологического общества России. Москва, 2016. С. 130–133.
19. High performance lightweight concretes for 3D printing / A. Rassokhin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2022. №7.
20. Полимерное связующее, композиционный материал на его основе и способ его изготовления: пат. 2223988 Рос. Федерация: МПК C08L 63/00, B32B 17/10, C08K 3/04/ Е.Н. Каблов [и др.]; заявитель и патентообладатель Всеросс. науч.-исслед. институт авиационных материалов. – № 2001130965/04; заявл. 19.11.2001; опубл. 20.02.2004.
21. Achievements in the field of studying the mechanism and application of nanoparticles to modify their concrete / C. Li [et al.] // Inorganics. 2025. Vol. 13. № 9.
22. Войтович В.А. Нанонаука. Нанотехнология. Наностройматериалы // Приволжский научный журнал. 2008. № 1. С. 14–20.
23. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. № 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849
24. A Study on the Properties of Geopolymer Concrete Modified with Nano Graphene Oxide / A.M. Maglad [et al.] // Buildings. 2022. Vol. 12. № 8. Article 1066. DOI: 10.3390/buildings12081066
25. Влияние нанокompозитов SiO₂ и ZnO на механические и химические свойства модифицированного бетона / К.Б. Наяк [и др.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. T. 46. С. 1237–1247.

References

1. Dashko L.V. Metody issledovaniya betonnyh konstrukcij posle vzryva i posleduyushchego pozhara // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 1 (65). S. 193–203.
2. Luk'yanov D.E. Pozharnaya bezopasnost' v processe pererabotki neftegazovyh produktov: sovremennye vyzovy i resheniya // Vestnik nauki. 2025. T. 4. № 4 (85). S. 908–914.
3. Ablaeva U.Sh., Dosaliyev K.S., Abduzhalilov H.B. Prochnost' i ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij // Ekonomika i socium. 2025. № 4-2 (131). S. 112–117.
4. Mnogoslojnye ugleodnye nanotrubki i ih primenenie / M.M. Tomishko [i dr.] // Rossijskij himicheskij zhurnal. 2008. № 5. S. 3–11.
5. Ponomarev A.N. Vysokokachestvennye betony. Analiz vozmozhnostej i praktika ispol'zovaniya metodov nanotekhnologii // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2009. № 6. S. 25–33.
6. Inozemcev A.S., Korolev E.V. Prochnost' nanomodifitsirovannyh vysokoprochnyh legkih betonov // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2013. T. 5. № 1. S. 24–38.
7. Yasinskaya E.V., Nikulin N.M., Krivcov E.E. Issledovanie harakteristik nanomodifitsirovannyh suhih stroitel'nyh smesej // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2011. № 2 (20). S. 29–32.
8. Astraleny – ugleodnye nanomodifikatory fulleroidnogo tipa / A.I. Ponomarev [i dr.] // Trudy mezhdunar. konf. TPKMM. Moskva, 2003 g. S. 147–152.

9. Issledovanie dinamicheskoy prochnosti i zhestkosti izdelij iz melkozernistogo betona, modificirovannogo nanostrukturnym shungitovym napolnitelem / G.E. Shablinskij [i dr.] // Vestnik MGSU. 2010. № 2. S. 231–236.
10. Eksperimental'noe issledovanie zashchit ot gamma-izlucheniya organo-metallicheskih kompozicij / O.L. Tashlykov [i dr.] // Global'naya yadernaya bezopasnost'. 2015. № 2 (15). S. 49–55.
11. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona: ucheb. 5-e izd. M.: Izdatel'stvo ASV, 2011. 528 s.
12. Issledovanie ekspluatatsionnyh harakteristik ognезashchitnyh pokrytij na osnove epoksidnyh smol, modificirovannyh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvbezopasnost'. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68
13. Kirsanova A.A. Nanotekhnologii v stroitel'stve. Chelyabinsk: Izdatel'skij centr YuUrGU, 2019. 47 s.
14. Plotnikov D.A., Bashevaya T.S. Ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij iz vtorichnogo syr'ya // Nauchnyj vestnik NIIGD Respirator. 2017. № 3 (54). S. 57–65.
15. Matveeva E.G. Povyshenie effektivnosti betona dobavkoj nanodispersnogo kremnezema: dis. ... kand. tekhn. nauk. Belgorod, 2011. 196 s.
16. Issledovanie vozmozhnosti modifikacii karboksilatnyh plastifikatorov v sostave modificirovannyh melkozernistykh betonnyh smesey / S.S. Kiski [i dr.] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2012. № 8 (34). S. 42–46.
17. Huseien G.F. A Review on Concrete Composites Modified with Nanoparticles // Journal of Composites Science. 2023. № 2. Article 67. DOI: 10.3390/jcs7020067
18. Melkozernistye modificirovannye fibrobetony na osnove kompleksnyh modificiruyushchih dobavok / T.A. Nizina [i dr.] // VII Ezhegod. konf. Nanotekhnologicheskogo obshchestva Rossii. Moskva, 2016. S. 130–133.
19. High performance lightweight concretes for 3D printing / A. Rassokhin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2022. №7.
20. Polimernoe svyazuyushchee, kompozicionnyj material na ego osnove i sposob ego izgotovleniya: pat. 2223988 Ros. Federaciya: MPK C08L 63/00, B32B 17/10, C08K 3/04/ E.N. Kablov [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Vseross. nauch.-issled. institut aviacionnyh materialov. – № 2001130965/04; zayavl. 19.11.2001; opubl. 20.02.2004.
21. Achievements in the field of studying the mechanism and application of nanoparticles to modify their concrete / C. Li [et al.] // Inorganics. 2025. Vol. 13. № 9.
22. Vojtovich V.A. Nanonauka. Nanotekhnologiya. Nanostrojmaterialy // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2008. № 1. S. 14–20.
23. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. № 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849
24. A Study on the Properties of Geopolymer Concrete Modified with Nano Graphene Oxide / A.M. Maglad [et al.] // Buildings. 2022. Vol. 12. № 8. Article 1066. DOI: 10.3390/buildings12081066
25. Vliyanie nanokompozitov SiO₂ i ZnO na mekhanicheskie i himicheskie svojstva modificirovannogo betona / K.B. Nayak [i dr.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. T. 46. S. 1237–1247.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 09.04.2026; одобрена после рецензирования: 24.05.2026;
принята к публикации: 26.05.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 09.04.2026; approved after review: 24.05.2026;
accepted for publication: 26.06.2026

Информация об авторах:

Пылаева Елизавета Андреевна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: elizavetapylaeva2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6753-0908>, SPIN-код: 1479-0786

Information about authors:

Pylaeva Elizaveta A., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: elizavetapylaeva2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6753-0908>, SPIN: 1479-0786

Научная статья

УДК 004.89; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-171-178

**ВЕРИФИКАЦИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
МЕРОПРИЯТИЙ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ
НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ**✉ **Матвеев Алексей Сергеевич.****МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия**✉ matveev@mirea.ru

Аннотация. Рассмотрена задача автоматизированной проверки исполнения мероприятий национальных проектов по их количественным результатам. Источником информации служит пакет отчётных документов, поступающий от исполнителя в контролирующий орган. Состав пакета заранее не известен, документы разнородны по типу и информационной природе. Простое суммирование числовых значений из таких документов даёт завышенный результат, поскольку одна транзакция, как правило, отражена в нескольких документах сразу. В статье предложена архитектура количественной проверки, использующая три последовательных пути: суммирование по серии однотипных первичных документов, сравнение с максимумом значений из агрегатных документов, дедуплицированная сумма с привлечением языковой модели. Пути расположены по убыванию степени доверия к результату. Архитектура реализована в составе программного пайплайна и апробирована на реальных пакетах. Научная новизна состоит в иерархической организации путей, при которой вероятностный метод применяется только тогда, когда другие способы не работали.

Ключевые слова: автоматизированный аудит, национальные проекты, большие языковые модели, верификация количественных показателей, дедупликация транзакций, on-premise large language model

Для цитирования: Матвеев А.С. Верификация количественных результатов мероприятий национальных проектов на основе больших языковых моделей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 171–178. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-171-178

Scientific article

**VERIFICATION OF QUANTITATIVE RESULTS OF NATIONAL
PROJECT ACTIVITIES BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS**✉ **Matveev Alexey S.****MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia**✉ matveev@mirea.ru

Abstract. The paper considers the task of automated verification of Russian national project activities by their quantitative outcomes. The source of information is a package of reporting documents submitted by the executor to the oversight body. The composition of the package is not known in advance, and the documents are heterogeneous in type and informational nature. A simple summation of numerical values from such documents yields an inflated result, since one transaction is typically reflected in several documents at once. The paper proposes a verification architecture that uses three sequential paths: summation over a series of uniform primary documents, comparison with the maximum among aggregate documents, and a deduplicated sum obtained with a language model. The paths are ordered by decreasing degree of trust in the result. The architecture has been implemented within a software pipeline and tested on real document packages. The scientific novelty lies in the hierarchical organization of paths, where the probabilistic method is engaged only when the other methods have failed.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Keywords: automated audit, national projects, large language models, quantitative verification, transaction deduplication, on-premise large language model

For citation: Matveev A.S. Verification of quantitative results of national project activities based on large language models // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 171–178. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-171-178

Введение

Ежегодная проверка исполнения мероприятий национальных проектов требует от контролирующего органа сопоставления плановых количественных показателей с фактически достигнутыми. План задан в паспорте мероприятия и содержит число, срок и тип агрегации. Факт же приходит к проверяющему в виде пакета отчётных документов от исполнителя. Состав пакета не регламентирован, и в нём могут встречаться накладные, акты, договоры, сводные отчёты, итоговые письма, фотоотчёты и многое другое. Объём такого пакета доходит до одного гигабайта в формате PDF.

Сегодня значительная часть этой работы выполняется вручную. Специалист открывает каждый документ, находит в нём числовые значения, оценивает их связь с проверяемым мероприятием и складывает соответствующие значения. Очевидно, что при тысячах мероприятий такой подход плохо масштабируется. Возникает потребность в автоматизации хотя бы первичного этапа – извлечения и сопоставления количественных показателей. Современные методы понимания макета документа [1, 2] и большие языковые модели [3, 4] позволяют такую задачу решать. Их применение в задачах аудита и государственной отчётности обсуждается в работах [5, 6].

Однако наивная автоматизация – извлечь все числа из документов и сложить – приводит к завышению результата. Дело в том, что одна и та же транзакция обычно отражена сразу в нескольких документах. Поставка из ста единиц оборудования упомянута в накладной, в акте приёма-передачи и затем в сводном отчёте за квартал. Простое сложение даст 300 единиц вместо 100. Дополнительная проблема состоит в том, что документы внутри пакета неравноценны по своей роли. Накладная фиксирует одну транзакцию, тогда как сводный отчёт уже содержит накопленный итог. Складывать их между собой нельзя. Задача дедупликации однотипных записей в разных источниках исследуется в рамках направлений record linkage и entity resolution [7, 8]; для документооборота нацпроектов её осложняет отсутствие единых идентификаторов транзакций.

Цель настоящей работы – предложить архитектуру количественной верификации, которая разводит документы пакета по их информационной природе и применяет к каждой группе свою стратегию подтверждения. Задачи работы: построить логику выбора стратегии, формализовать три типа агрегации (суммарный, нарастающий, убывающий) и апробировать архитектуру на реальных пакетах отчётности.

Методы исследования

Формальная постановка: мероприятие задаётся кортежем (n, P, d, A) : n – название, P – плановое значение, d – крайний срок, A – тип агрегации. Возможные типы агрегации – суммарный, нарастающий и убывающий. Тип закреплён в паспорте мероприятия и в ходе проверки не меняется. На вход системе подаётся пара: мероприятие из паспорта и пакет документов от исполнителя. На выход требуется получить вердикт из трёх возможных – подтверждено, не подтверждено, требует ручной проверки, – а также текстовое обоснование к нему.

Перед собственно верификацией каждый документ пакета классифицируется по своей информационной природе. Выделено семь канонических категорий: акты приёма-передачи, финансовые транзакционные документы, накладные и инвентаризационные документы,

агрегатные документы (сводные отчёты, итоговые письма), бухгалтерские документы, прочие, неклассифицированные. Эта классификация выполняется отдельным шагом пайплайна и далее используется для маршрутизации документов по разным веткам верификации. Архитектурные вопросы клиент-серверной организации и единого хранилища промежуточных результатов рассмотрены в работах [9, 10].

Далее автор переходит к описанию основной логики – той, что применяется при суммарном типе агрегации. Логика организована как последовательность трёх путей. Первый путь самый простой и не требует языковой модели вовсе. Второй также детерминирован, но опирается на правильную классификацию документов на предыдущем шаге. Третий путь привлекает языковую модель и применяется только тогда, когда первые два не сработали. Такой порядок отражает разную степень доверия к результату: чем ниже путь в иерархии, тем больше в нём вероятностной составляющей.

Путь 1 – серия первичных документов одного типа. Если в пакете есть серия однотипных первичных документов, например, набор накладных одной серии нумерации, то их значения складываются и сравниваются с планом P . При сумме не менее P принимается вердикт «подтверждено». Серия однотипных документов одной нумерации не может описывать одну и ту же транзакцию по самой природе организационного документооборота, поэтому никакой дополнительной дедупликации тут не требуется.

Путь 2 – агрегатный максимум. Если первый путь не сработал, берутся документы из категории «агрегатные» – сводные отчёты и итоговые письма. Из их значений отбирается максимальное. При этом максимуме не менее P принимается вердикт «подтверждено». Агрегатные значения нельзя суммировать ни между собой, ни с первичными: каждое из них уже содержит накопленный итог, и сложение приведёт к двойному учёту.

Путь 3 – дедуплицированная сумма от языковой модели. Если первые два пути не дали подтверждения, привлекается языковая модель. Её работа разбита на два последовательных обращения. В первом обращении модели передаются документы пакета и числовые значения из них; задача – сгруппировать документы в уникальные транзакции, объединив дубликаты (то есть записи в разных документах, относящиеся к одному и тому же событию). Во втором обращении формируется текстовое обоснование принятого вердикта. Если дедуплицированная сумма достигает или превышает P , вердикт – «требует ручной проверки», а не «подтверждено». Это сознательное решение: группировка, выполненная моделью, не имеет формальных гарантий корректности, и финальное слово остаётся за человеком. Способы снижения вариативности языковых моделей рассмотрены в работах [11, 12], а вопросы эффективного инференса – в [13]. В авторской работе [14] показано, что многократный вызов одной модели с голосованием большинства повышает воспроизводимость результата по сравнению с одиночным вызовом.

Если ни один из трёх путей не дал положительного результата, вердикт – «не подтверждено». Описанная логика относится к суммарному типу агрегации. Для нарастающего типа задача проще: код собирает из всех документов пары (дата, накопленное значение), упорядочивает их по времени и проверяет, достигнут ли план к нужному сроку. Для убывающего типа логика зеркальная – ищется минимум.

Кроме трёх основных путей, в системе работает предварительный санитарный фильтр. Он распределяет документы по пяти бакетам: кандидаты на подсчёт суммы, агрегатные документы, бухгалтерские (в подсчёте количественного результата не участвуют), документы с подозрительными значениями (выбросы) и нерелевантные. Фильтр работает на детерминированном коде и языковую модель не задействует.

Реализация выполнена на Java. Инференс языковой модели обеспечен фреймворком vLLM с continuous batching [13]. В качестве модели используется Gemma 4 26B A4B (instruction-tuned) – MoE-модель с общим числом параметров порядка 25 млрд, из которых при каждом проходе активны примерно 3,8 млрд. Разреженная активация позволяет получить пропускную способность, близкую к плотной модели меньшего размера, при качестве, ожидаемом от модели с существенно большим общим числом параметров. Модель

развёрнута на одном графическом ускорителе NVIDIA H100 в квантизации FP8 (как для весов, так и для KV-кэша). Суммарная пропускная способность инференса с учётом входных и выходных токенов составляет порядка 1 400 токенов в секунду. Промежуточные результаты всех шагов пайплайна пишутся в PostgreSQL. Весь контур работает локально, без передачи данных внешним сервисам, что соответствует требованиям к работе с ведомственной информацией.

Стоит отдельно выделить ещё одно решение, заложенное в архитектуру. Вердикт – то есть выбор одного из трёх значений – определяется кодом, а не языковой моделью. Модель используется только для написания текстового обоснования. Такое разделение ролей делает результат воспроизводимым: один и тот же пакет документов с одним и тем же планом всегда даст один и тот же вердикт. Кроме того, логика принятия решения легко проверяется по коду, а не по диалогу с моделью.

Результаты исследования и их обсуждение

Архитектура реализована в составе пайплайна и апробирована на реальных пакетах отчётных документов. По итогам предшествующих шагов в базу данных загружено 2 370 валидных результатов извлечения числовых значений. Это итог обработки 2 910 исходных строк, из которых 452 (15,5 %) были отсеяны по лимиту длины OCR-представления в 120 000 символов, а 88 (3,0 %) – по причине синтаксических ошибок в извлечённых данных. Поскольку расчёт количественных метрик качества (accuracy, precision, recall) на данном этапе работы не проводился, в виде апробации приводится качественный разбор поведения архитектуры на серии обезличенных кейсов. Кейсы подобраны так, чтобы покрыть срабатывание каждого из трёх путей, нарастающий режим и граничный случай с отрицательным вердиктом.

В первом рассмотренном пакете сработал Путь 1. Мероприятие – оснащение комплектами образовательного оборудования. План – 120 комплектов к 31 декабря 2025 г., тип агрегации – суммарный. В пакете лежат восемь накладных одной серии нумерации (по 15 комплектов каждая), сводный отчёт за квартал и фотоотчёт. На шаге классификации накладные отнесены к первичным инвентаризационным, сводный отчёт – к агрегатным, фотоотчёт – к прочим. Шаг верификации сразу применил Путь 1: серия восьми накладных даёт $8 \times 15 = 120$ комплектов, что равно плану. Вердикт – «подтверждено». Остальные пути не запускались, и значение из сводного отчёта в подсчёте не участвовало – что и требовалось для предотвращения двойного учёта.

Во втором пакете результат был подтверждён по агрегатному документу. Мероприятие – проведение мероприятий регионального уровня. План – 50 мероприятий, тип агрегации суммарный. В пакете итоговое письмо губернатора региона с фразой о проведённых 52 мероприятиях, три отдельных протокола конкретных мероприятий и фотоотчёт. Путь 1 здесь не сработал: три протокола слишком разнотипны и не образуют единой серии, а их арифметическая сумма равна трём. Сработал Путь 2: максимум среди агрегатных документов равен 52, что не меньше 50. Вердикт – «подтверждено». Если бы значения из протоколов были прибавлены к значению из итогового письма, получилось бы 55 – неверный ответ. Корректный ответ – 52, и архитектура его даёт.

Третий кейс – единственный, в котором срабатывает Путь 3. Мероприятие – ввод в эксплуатацию инженерных коммуникаций. План – 25 километров к 30 июня 2025 г., тип агрегации суммарный. В пакете акт ввода первого этапа на 12 км, договор подряда с упоминанием тех же 12 км, сводный отчёт с фразой «12 км по первому этапу и 14 км по второму», а также акт ввода второго этапа на 14 км. Путь 1 неприменим – акты относятся к разным этапам и в одну серию не складываются. Путь 2 тоже неприменим – сводный отчёт даёт детализацию по этапам, а не один итог, который можно сопоставить с планом. Подключается Путь 3. Языковая модель в первом вызове группирует документы в две уникальные транзакции – 12 км первого этапа (подтверждается тремя документами) и 14 км

второго этапа (подтверждается двумя). Дедуплицированная сумма – $12 + 14 = 26$ км, что не меньше плана. Вердикт – «требуется ручной проверки», потому что группировку выполнила модель, и окончательное слово остаётся за специалистом-аудитором.

Четвёртый пакет иллюстрирует нарастающий режим. Мероприятие – охват программой повышения квалификации специалистов накопительным итогом. План – 5 000 специалистов к 31 декабря 2025 г. В пакете четыре ежеквартальных отчёта со значениями 1 400, 2 900, 4 200, 5 100. Код извлёк пары (дата, значение), упорядочил их и нашёл пик 5 100, достигнутый к нужному сроку. Поскольку 5 100 не меньше 5 000, вердикт – «подтверждено».

Пятый пакет показывает ситуацию с отрицательным вердиктом. Мероприятие – поставка единиц технологического оборудования. План – 80 единиц, тип агрегации суммарный. В пакете три накладные на 15, 15 и 10 единиц, агрегатных документов нет. Путь 1: сумма по накладным 40, что меньше 80. Путь 2 неприменим – нет агрегатных документов. Путь 3: дедуплицированная сумма по тем же документам также 40, что меньше 80. Вердикт по всем путям одинаков – «не подтверждено». Кейс важен тем, что показывает, как архитектура ведёт себя при объективной нехватке документов: система не экстраполирует отсутствующие данные и возвращает согласованный отрицательный ответ.

Логика проверки в суммарном режиме сведена в таблице.

Таблица

Иерархия путей верификации в суммарном режиме

Путь	Условие применения	Решающее правило	Вердикт
1	Есть серия однотипных первичных документов	Сумма серии $\geq P$	Подтверждено
2	Путь 1 не сработал; есть агрегатные документы	Максимум значений агрегатных документов $\geq P$	Подтверждено
3	Пути 1 и 2 не сработали	Дедуплицированная сумма (LLM) $\geq P$	Требуется ручной проверки
–	Ни один из путей не сработал	–	Не подтверждено

Далее автор разбирает общие свойства предложенной архитектуры. Иерархия путей устроена так, что приоритет имеет наиболее простой способ – серия однотипных первичных документов, для которой никакая дедупликация вообще не нужна. Языковая модель в этой архитектуре стоит в самом конце очереди, и её результат специально ограничен вердиктом «требуется ручной проверки». Это сделано осознанно: дедупликация моделью не имеет формальных гарантий, и автоматически подтверждать что-либо на её основе было бы неправильно.

Предложенный подход сравнивается с прямолинейным – суммированием всех чисел из всех документов пакета и сравнением итога с планом. Прямолинейный подход даёт неверный результат сразу в трёх ситуациях. Первая: в пакете есть агрегатный документ с итоговым значением, и он суммируется с первичными – получается завышение. Вторая: одна транзакция отражена в нескольких документах, и каждый из них считается отдельно – снова завышение. Третья: пакет смешанный, то есть в нём и первичные, и агрегатные источники одновременно – завышение по обоим причинам сразу. Предложенная архитектура каждую из этих ситуаций разводит.

Главное практическое ограничение системы на сегодня – лимит длины OCR-представления документа в 120 000 символов. Документы, превышающие этот лимит, отсекаются и в дальнейшей обработке не участвуют. В среднем по прогонам отсекается около 15,5 % документов, но на отдельных подвыборках доля доходит до 37 %. Особенно страдают пакеты с длинными документами – региональными программами, годовыми отчётами, многостраничными приказами. Здесь возможны несколько направлений работы: разбиение длинных документов на части с последующим объединением результатов, переход на модель с расширенным контекстным окном, использование vision-language модели в качестве резервного канала для разбора длинных документов.

Второе направление развития – формальная количественная оценка качества. В рамках настоящей работы такая оценка не приводится: она потребует независимой разметки корпуса несколькими аудиторам с последующим расчётом согласия между ними. Это отдельная исследовательская задача, выходящая за рамки текущего этапа.

Заключение

В работе предложена архитектура автоматизированной верификации количественных результатов мероприятий национальных проектов. В её основе – иерархическая последовательность из трёх путей подтверждения: суммирование по серии однотипных первичных документов, сравнение с максимумом среди агрегатных документов и дедулицированная сумма, восстановленная языковой моделью. Архитектура обрабатывает разнородные пакеты отчётности, в которых одна транзакция может быть отражена в нескольких документах одновременно, а часть документов является агрегатными по своей природе.

Научная новизна работы состоит в самой иерархии путей. Приоритет отдан тем способам подтверждения, которые не привлекают вероятностную модель и опираются на свойства документооборота, известные заранее. Вероятностный путь применяется только в случае, когда первые два не сработали, и его результатом служит более консервативный вердикт – «требует ручной проверки». Такая организация принципиально отличается от прямолинейного сложения всех чисел из всех документов и устраняет систематическое завышение, которое возникает из-за дублирования транзакций и смешения первичных и агрегатных источников.

Архитектура реализована в составе пайплайна на локально развёрнутой языковой модели и апробирована на реальных пакетах отчётных документов. Качественный разбор обезличенных кейсов показал согласованное поведение всех путей и корректность принимаемых вердиктов. Полученные результаты могут быть использованы в задачах ведомственного аудита исполнения программ и проектов, имеющих количественные целевые показатели. Дальнейшее развитие связано с обработкой длинных OCR-представлений, созданием размеченного корпуса для количественной оценки качества и переносом иерархического принципа на другие задачи автоматизированной проверки отчётности.

Список источников

1. LayoutLM: Pre-training of Text and Layout for Document Image Understanding / Y. Xu [et al.] // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2020. P. 1192–1200.
2. OCR-Free Document Understanding Transformer / G. Kim [et al.] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision. 2022. P. 498–517.
3. Language Models are Few-Shot Learners / T.B. Brown [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.
4. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models / H. Touvron [et al.] // arXiv preprint arXiv:2307.09288. 2023.

5. Дудихин В.В., Кондрашов П.Е. Методология использования больших языковых моделей для решения задач государственного и муниципального управления по интеллектуальному реферированию и автоматическому формированию текстового контента // Государственное управление. Электронный вестник. 2024. № 105. С. 5–18.
6. Натарова Е.В. Цифровая трансформация в системе государственного аудита // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2024. № 4 (69). С. 76–88.
7. Christen P. Data Matching: Concepts and Techniques for Record Linkage, Entity Resolution and Duplicate Detection. Heidelberg: Springer, 2012. 270 p. DOI: 10.1007/978-3-642-31164-2
8. Köpcke H., Rahm E. Frameworks for entity matching: A comparison // Data & Knowledge Engineering. 2010. Vol. 69. № 2. P. 197–210. DOI: 10.1016/j.datak.2009.10.003
9. Лиманова Н.И., Селезнев И.А. Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. № 7. С. 392–396. DOI: 10.33619/2414-2948/80/37
10. vLLM. Official documentation. URL: <https://docs.vllm.ai/en/latest/> (дата обращения: 21.05.2026).
11. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models / J. Wei [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2022. Vol. 35. P. 24824–24837.
12. Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models / X. Wang [et al.] // Proceedings of the International Conference on Learning Representations. 2023.
13. Efficient Memory Management for Large Language Model Serving with PagedAttention / W. Kwon [et al.] // Proceedings of the 29th Symposium on Operating Systems Principles. 2023. P. 611–626. DOI: 10.1145/3600006.3613165
14. Задорнов А.А., Никонов С.С., Федотов М.В. Влияние единого информационного пространства на автоматизацию процесса получения и обработки информации // Вестник экономических и социологических исследований. 2024. № 1. С. 21–27.

References

1. LayoutLM: Pre-training of Text and Layout for Document Image Understanding / Y. Xu [et al.] // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2020. P. 1192–1200.
2. OCR-Free Document Understanding Transformer / G. Kim [et al.] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision. 2022. P. 498–517.
3. Language Models are Few-Shot Learners / T.B. Brown [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.
4. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models / H. Touvron [et al.] // arXiv preprint arXiv:2307.09288. 2023.
5. Dudihin V.V., Kondrashov P.E. Metodologiya ispol'zovaniya bol'shih yazykovykh modelej dlya resheniya zadach gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya po intellektual'nomu referirovaniyu i avtomaticheskomu formirovaniyu tekstovogo kontenta // Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik. 2024. № 105. S. 5–18.
6. Natarova E.V. Cifrovaya transformaciya v sisteme gosudarstvennogo audita // Nauchnyj vestnik: finansy, banki, investicii. 2024. № 4 (69). S. 76–88.
7. Christen P. Data Matching: Concepts and Techniques for Record Linkage, Entity Resolution and Duplicate Detection. Heidelberg: Springer, 2012. 270 p. DOI: 10.1007/978-3-642-31164-2
8. Köpcke H., Rahm E. Frameworks for entity matching: A comparison // Data & Knowledge Engineering. 2010. Vol. 69. № 2. P. 197–210. DOI: 10.1016/j.datak.2009.10.003
9. Limanova N.I., Seleznev I.A. Analiz effektivnosti klient-servernoj arhitektury // Byulleten' nauki i praktiki. 2022. T. 8. № 7. S. 392–396. DOI: 10.33619/2414-2948/80/37
10. vLLM. Official documentation. URL: <https://docs.vllm.ai/en/latest/> (data obrashcheniya: 21.05.2026).

11. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models / J. Wei [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2022. Vol. 35. P. 24824–24837.
12. Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models / X. Wang [et al.] // Proceedings of the International Conference on Learning Representations. 2023.
13. Efficient Memory Management for Large Language Model Serving with PagedAttention / W. Kwon [et al.] // Proceedings of the 29th Symposium on Operating Systems Principles. 2023. P. 611–626. DOI: 10.1145/3600006.3613165
14. Zadornov A.A., Nikonov S.S., Fedotov M.V. Vliyanie edinogo informacionnogo prostranstva na avtomatizaciyu processa polucheniya i obrabotki informacii // Vestnik ekonomicheskikh i sociologicheskikh issledovaniy. 2024. № 1. S. 21–27.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 29.05.2026; одобрена после рецензирования: 26.06.2026; принята к публикации: 29.06.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 29.05.2026; approved after review: 26.06.2026; accepted for publication: 29.06.2026

Информация об авторах:

Матвеев Алексей Сергеевич, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории НОЦ ИИ Института ИИ МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: matveev_as@mirea.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6013-0950>

Information about authors:

Matveev Alexey S., junior researcher at the research laboratory of the scientific and educational center, Institute of artificial intelligence of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: matveev_as@mirea.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6013-0950>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева»

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev»

[16+]

Научно-аналитический журнал
Scientific and analytical journal

**«Вестник Санкт-Петербургского университета
ГПС МЧС России»**

«Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service
of EMERCOM of Russia»

№ 2–2026

Главный редактор

Матвеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент

Chief Editor

Matveev Alexander V., PhD in technical sciences, associate professor

Регистрационный орган: Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Registration authority: Federal service for supervision of communications, information technology and mass communications (Roskomnadzor)

Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77-35048 от 20 января 2009 г.

Registration certificate: EL № FS 77-35048 dated January 20, 2009.

**Адрес редакции и издателя научно-аналитического журнала
«Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России»:**

Россия, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»
телефон для справок: +7(812)645-20-35, e-mail: redakziaotdel@yandex.ru

Editorial and publishing office of the scientific and analytical journal
«Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia»:

Russia, 196105, Saint Petersburg, Moskovsky ave., 149
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia
phone for inquiries: +7(812)645-20-35, e-mail: redakziaotdel@yandex.ru

Подписано в печать 03.07.2026
Печать цифровая

Submitted to the press 03.07.2026
Digital printing

Вышел в свет 06.07.2026

Объем 23 п.л.
Свободная цена
Published 06.07.2026
Tentative printed sheets 23
Open price

Формат 60×84_{1/8}
Тираж 5 экз.

Format 60×84_{1/8}
Circulation 5 copies

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149.

Printed in Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia
196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149