

4-2024

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493 (Print)
ISSN 2587-6201 (Online)

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ
РЕГРЕССИИ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА
ПРИВЛЕКАЕМЫХ СИЛ НА ЛИКВИДАЦИЮ
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Журнал издается с 1992 г.,
периодичность — 6 номеров в год.

СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций — свидетельство
ПИ № ФС 77-79402 от 2 ноября 2020 г.
Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Корзухина Л.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректор **Ермихина О.В.**
Дизайнер **Алейникова Ю.З.**

Адрес редакции:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Адрес для переписки:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26,
корп. 8

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий,
рекомендованных ВАК России для публикации
трудов соискателей ученых степеней,
в Реферативный журнал и базы данных
ВИНИТИ РАН, в базу данных Российского
индекса научного цитирования (РИНЦ),
в Справочно-библиографическую службу EBSCO.
Сведения о журнале ежегодно публикуются
в Международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory». Переводные
версии статей журнала входят в Международный
реферативный журнал Chemical Abstracts.

Перепечатка материалов журнала
«Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion
Safety» только по согласованию с редакцией.
При цитировании ссылка не обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность
за содержание представленных в редакцию
материалов и публикацию их в открытой печати.
Мнение редакции не всегда совпадает
с мнением авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 26.08.2024.

Выход в свет 30.08.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8.

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: www.ro.wikipedia.org,
www.krd.energo-e.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Корольченко Д.А., д. т. н., академик МАНЭБ (Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбпи, Велико-
британия)

Стрижак П.А., д. ф.-м. н., профессор (Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бакиров И.К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический универси-
тет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

Барбин Н.М., д. т. н., к. х. н., профессор, почетный работник науки и техники
РФ (Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,
Екатеринбург, Россия)

Берлин А.А., д. х. н., профессор, академик РАН (Федеральный исследовательский
центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия)

Богданова В.В., д. х. н., профессор (Научно-исследовательский институт физико-
химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь)

Вагнер П., д. т. н. (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Германия)

Калач А.В., д. х. н., профессор (Воронежский государственный технический универ-
ситет, Воронеж, Россия)

Кузнецов С.В., д. ф.-м. н., профессор (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлин-
ского Российской академии наук, Москва, Россия)

Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государствен-
ной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия)

Малыгин И.Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

Поландов Ю.Х., д. т. н., профессор (Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Москва, Россия)

Пузач С.В., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный дея-
тель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Москва, Россия)

Раимбеков К.Ж., к. ф.-м. н. (Кокшетауский технический институт Комитета по чрез-
вычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан)

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государствен-
ной службы, Будапешт, Венгрия)

Серков Б.Б., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Академия Государ-
ственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Тамразян А.Г., д. т. н., профессор, действительный член Российской инженерной
академии (РИА), советник РААСН (Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Москва, Россия)

Таранцев А.А., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

Христов Б., д. т. н., профессор (Берлинский институт техники и экономики, Берлин,
Германия)

Челани А. (Миланский технический университет, Милан, Италия)

Чирик Р.М., д. т. н., профессор (Высшая техническая школа, Нови Сад, Сербия)

Шебеко Ю.Н., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (ВНИИПО МЧС России,
Балашиха Московской обл., Россия)

Шоус Р. (Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, Пенсильвания, США)

Якуш С.Е., д. ф.-м. н. (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской
академии наук, Москва, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ		CONTENTS	
ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА		COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES	
Н.Л. ПОЛЕТАЕВ, М.С. САЗОНОВ, М.Ю. КОПТЕВ Исследование взрывоопасности аэрозвеси свинца		N.L. POLETAEV, M.S. SAZONOV, M.Yu. KOPTEV Explosion hazard study of lead dust/air mixture	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ		MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES	
А.А. ЕВСИКОВ, И.В. САМАРИН Обнаружение и определение точного местоположения очага возгорания с использованием сверточной нейронной сети, панорамного изображения и 3D-модели объекта наблюдения		A.A. EVSIKOV, I.V. SAMARIN Detection and determination of the exact location of the fire centre using a convolutional neural network, panoramic image and 3D model of the observed object	
И.Н. ПОЖАРКОВА Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования		I.N. POZHARKOVA Investigation of fire temperature regime in an underground research laboratory based on numerical modelling	
БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ		SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT	
М.В. ГРАВИТ, Э.З. МАМЕДОВ Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин		M.V. GRAVIT, E.Z. MAMEDOV Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures	
БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ		SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS	
Л.А. КОРОЛЕВА, А.Г. ХАЙДАРОВ Система мониторинга и прогнозирования пожароопасных состояний мест размещения и накопления твердых коммунальных отходов при их захоронении и транспортировке		L.A. KOROLEVA, A.G. KHAYDAROV System of monitoring and predicting of fire hazardous conditions of municipal solid waste disposal and accumulation sites during their disposal and transportation	
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ		LIFE SAFETY	
В.В. КРЫМСКИЙ, А.Б. БОЙЦОВ, Е.И. ДАШКЕВИЧ, Р.А. ЮРЧЕНКО, В.Р. ГОЛОВЕНКО Перспективы развития дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде		V.V. KRYMSKIY, A.B. BOYTSOV, E.I. DASHKEVICH, R.A. YURCHENKO, V.R. GOLOVENKO Prospects for the development of breathing apparatus using chemically bound oxygen	
СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ		STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS	
Д.В. МЕДВЕДЕВ, А.В. МАТВЕЕВ, А.С. СМІРНОВ Применение модели логистической регрессии при принятии решений по определению количества привлекаемых сил на ликвидацию лесных пожаров		D.V. MEDVEDEV, A.V. MATVEEV, A.S. SMIRNOV Application of a logistic regression model in decision-making on determining the number of forces involved in the elimination of forest fires	
СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ		MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING	
Р.В. ХАЛИКОВ, В.В. РОЕНКО, И.Р. БЕГИШЕВ, Т.Н. ХАЛИКОВА, А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО Перспективы применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов		R.V. KHALIKOV, V.V. ROENKO, I.R. BEGISHEV, T.N. KHALIKOVA, A.D. KOROLCHENKO Prospects of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires	
ВОПРОС – ОТВЕТ		QUESTION – ANSWER	
А.С. ХАРЛАМЕНКОВ Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 1		A.S. KHARLAMENKOV Fire hazard of dust accumulation in electrical installations. Part 1	



Определение точного местоположения очага возгорания

Стр. 13



Стр. 36

Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад



Прогнозирования пожароопасных состояний твердых отходов

Стр. 52



Стр. 69

Перспективы развития дыхательных аппаратов на кислороде

Стр. 97



Применение водной среды для предотвращения пожаров



FOUNDER and PUBLISHER —

Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education Moscow
State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU)

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate PI
No. FS 77-79402 on November 2, 2020.
DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

Russian-English translation **Yudenkova O.V.**

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Corresponding to: Yaroslavskoe Shosse,
26/8, Moscow, 121352, Russia.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion
Safety" is included in the List of periodical scientific
and technical publication, recommended by
Higher Attestation Commission of the Russian
Federation for publishing aspirants' works for
candidate and doctoral degree, in Abstracting
Journal and Database of VINITI RAS, EBSCO.
Information about the journal is annually
published in "Ulrich's Periodicals Directory". English
version of "Fire and Explosion Safety" articles is
included in Chemical Abstract Service (CAS).

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means
without the prior permission of the Publishers.
Reproducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.
Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.
Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 26.08.2024.
Date of publication 30.08.2024.
Format is 60 × 84 1/8.
Printing is 2000 copies.
Chalk-overlay mat paper.
Offset printing. Free price.
Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house
MISI – MGSU
building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
Russian Federation, 129337.

EDITOR-IN-CHIEF:

D.A. Korolchenko, Dr. Sci. (Eng.), Academician of International Academy of Ecology
and Life Safety (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,
Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

V.V. Molkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern
Ireland, UK)

P.A. Strizhak, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (National Research Tomsk Polytechnic
University, Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD:

I.K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia,
Republic of Bashkortostan)

N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science
and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom
of Russia, Yekaterinburg, Russia)

A.A. Berlin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences
(Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical
Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)

P. Wagner, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)

A.V. Kalach, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Voronezh State Technical University, Voronezh,
Russia)

S.V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (A. Ishlinsky Institute for Problems in
Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.N. Lozhkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Saint Petersburg University of State Fire Service of
Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russia)

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

Yu.Kh. Polandov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (National Research Moscow State University of
Civil Engineering, Moscow, Russia)

S.V. Puzach, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of National Academy of
Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

K.Zh. Raimbekov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (Kokshetau Technical Institute, Committee
of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan,
Kokshetau, Kazakhstan)

A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management,
Budapest, Hungary)

B.B. Serkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science
(State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

A.G. Tamrazyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of Russian Academy of Engine-
ering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National
Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

A.A. Tarantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

B. Hristov, Dr. Ing., Professor (University of Applied Sciences, Berlin, Germany)

A. Celani (Polytechnic University of Milan, Milan, Italy)

R.M. Ciric, Ph. D., Professor (The Higher Technical School of Professional Studies, Novi
Sad, Serbia)

Yu.N. Shebeko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Sci-
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,
Moscow Region, Russia)

R.C. Shouse, Ph. D. (Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United
States)

S.E. Yakush, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of
the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

Исследование взрывоопасности аэровзвеси свинца

Николай Львович Полетаев¹✉, Михаил Сергеевич Сазонов², Михаил Юрьевич Коптев²

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

² Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Кемеровская область — Кузбасс, г. Кемерово, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Пыль свинца в состоянии аэровзвеси имеет температуру самовоспламенения 710 °С и расчетное максимальное избыточное давление взрыва 400 кПа. В то же время аэровзвесь свинцовой пыли не взрывается при тестировании в 20-л камере с источником зажигания, имеющим энергию 2,5 кДж. Данные обстоятельства затрудняют ответ на вопрос о взрывоопасности свинцовой пыли в нормальных условиях обращения. В настоящей работе получены аргументы в пользу взрывобезопасности этой пыли при температуре 25 °С.

Свинцовая пыль и метод ее исследования. Пыль свинцового концентрата ($d_{50} = 8,5$ мкм, $d_{90} = 36,6$ мкм) с содержанием свинца не менее 99 % (масс.) исследована в 20-л взрывной камере Сивека с источником зажигания повышенной энергии (10 кДж).

Результаты. Взрывоопасность свинцовой пыли проявилась в диапазоне концентраций пыли от нижнего предела (500 г/м³) до верхнего предела (1500 г/м³). Во всем указанном диапазоне появление взрыва свинцовой пыли от опыта к опыту носило случайный характер. Максимальное избыточное давление взрыва составило ≈ 150 кПа, индекс взрыва $K_{st} \approx 2$ бар · м/с. В опытах со взрывом пыли восходящая ветвь зависимости давления в камере P от времени t имела две точки перегиба, в первой из которых достигался минимум, а во второй — максимум производной dP/dt .

Обсуждение и выводы. Результаты исследования свинцовой пыли имеют особенности, характерные для дисперсного материала, взрывобезопасного при нормальных условиях обращения: $K_{st} < 45$ бар · м/с (Proust, Accorsi, Dupont, 2007); случайный характер проявления взрывоопасности в широком диапазоне концентраций пыли и двухэтапный характер развития взрыва (Полетаев, Сазонов, Коптев, 2024). Таким образом, вероятнее всего, исследованная пыль свинца взрывобезопасна. Наблюдение случаев ее взрыва обусловлено эффектом «overdrive» — предварительным нагревом аэровзвеси в опытах с использованием энергетического источника зажигания.

Ключевые слова: пыль свинца; взрыв; 20-л камера Сивека; признаки перегрева; температура самовоспламенения

Для цитирования: Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Коптев М.Ю. Исследование взрывоопасности аэровзвеси свинца // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12

✉ Полетаев Николай Львович, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Explosion hazard study of lead dust/air mixture

Nikolay L. Poletaev¹✉, Mikhail S. Sazonov², Mikhail Yu. Koptev²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Lead dust/air mixture has an ignition temperature of 710 °C and an estimated maximum explosion pressure of 400 kPa. At the same time, the lead dust/air mixture does not explode in a 20-litre chamber with an ignition source having energy of 2.5 kJ. These circumstances make it difficult to answer the question about the explosiveness of lead dust under normal handling conditions. In this paper, arguments in favour of explosion safety of this dust at a temperature of 25 °C are obtained.

Lead dust and method of its study. Lead concentrate dust ($d_{50} = 8.5$ microns, $d_{90} = 36.6$ microns) with lead content of at least 99 % (wt.) was studied in a 20-liter Sivek explosion chamber with an ignition source of increased energy (10 kJ).

Results. The explosion hazard of lead dust was manifested in the range of dust concentrations from the lower limit (500 g/m^3) to the upper limit ($1,500 \text{ g/m}^3$). In the whole specified range, the occurrence of lead dust explosion from experiment to experiment was random. The maximum explosion pressure was 150 kPa, the explosion index K_{st} was $2 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$. The explosion pressure dependence on time $P(t)$ had two inflection points, in the first of which the minimum dP/dt was reached, and in the second point the maximum dP/dt was reached.

Discussion and conclusions. The results of the study of lead dust have features characteristic of a dispersed material that is explosion-proof under normal handling conditions: $K_{st} < 45 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ (Proust, Accorsi, Dupont, 2007); the random nature of the explosion in a wide range of dust concentrations and the two-stage explosion (Poletaev, Sazonov, Koptev, 2024). Thus, it is most likely that the investigated lead dust is explosion-proof. The cases of its explosion are due to the “overdrive” effect — airborne dust preheating in experiments using an energy-intensive ignition source.

Keywords: lead dust; explosion; 20-L Sivek chamber; overheating marks; ignition temperature

For citation: Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Explosion hazard study of lead dust/air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12 (rus).

✉ Nikolay Lvovich Poletaev, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Введение

Первое исследование взрывоопасности аэровзвеси пыли свинца с размером частиц менее 74 мкм провели специалисты US Bureau of Mines (USBM) [1] на оборудовании, разработанном еще до 1960 г. [2]. В печи Годберта – Гринвальда определили температуру самовоспламенения аэровзвеси $T_{ai} = 710^\circ\text{C}$. Возможность распространения пламени по аэровзвеси при нормальных начальных условиях (температуре $T_0 \approx 25^\circ\text{C}$, давлении $P_0 \approx 100 \text{ кПа}$ и содержании кислорода в воздухе $\approx 21\%$ об.) исследовали в цилиндрической взрывной камере Хартмана объемом 1,23 л. Источником зажигания (ИЗ) в камере являлась высоковольтная искра в электрической цепи, замыкающей обкладки конденсатора с первоначально запасенной энергией около 10 Дж. Опыты в широком диапазоне концентраций свинцовой пыли от 100 до 2000 г/м³ не зафиксировали случаев взрыва: превышение максимального абсолютного давления в камере P_m над атмосферным давлением составило 20 кПа.

Результат определения P_m противоречил расчетной оценке параметра ($\approx 500 \text{ кПа}$), выполненной в предположении о полном выгорании частиц свинцовой пыли [3]. Полагая в качестве причины противоречия неэффективность искрового ИЗ, в начале 1990-х гг. исследование взрывоопасности свинцовой пыли повторили в квазисферической 20-л взрывной камере конструкции USBM [3]. В качестве ИЗ использовали мощный пиротехнический заряд с запасом химической энергии $E_{ig} = 2,5 \text{ кДж}$. Повторные опыты, однако, подтвердили взрывобезопасность свинцовой пыли.

Обстоятельства, подобные описанным выше, характерны для невзрывоопасных пылей горючих материалов [3, 4] и пылей с низким уровнем взрывоопасности [5, 6]. В таких случаях используются, как правило, три варианта решения вопроса о взрывоопасности исследованной пыли в нормальных условиях обращения [7]. В первом варианте рекомендуется называть пыль «взрывобезопасной в условиях проведенных

испытаний» (ASTM standard¹), что, как будет видно из дальнейшего изложения, не является корректным ответом на поставленный вопрос. Во втором более надежном варианте рекомендуется провести дополнительные дорогостоящие эксперименты в камере объемом 1 м³ с мощным ИЗ ($E_{ig} = 10 \text{ кДж}$) [8]. В третьем наиболее надежном, но еще более дорогостоящем варианте, рекомендуются натурные испытания пыли в масштабах, характерных для промышленных условий обращения данной пыли с использованием потенциально возможных ИЗ или их эквивалентной замены [9]. Мотивацией к увеличению масштабов эксперимента является более полный учет влияния излучения пламени на горение аэровзвеси² [10]. При отсутствии финансовых или технических возможностей ограничиваются первым вариантом решения, сочетая его с поиском аргументов в пользу расширения границ применения полученных в 20-л камере результатов. Настоящая работа является примером такого подхода.

Согласно ГОСТ³, для уточнения ответа на вопрос о взрывоопасности свинцовой пыли рекомендуется продолжить исследования пыли в маломасштабной 20-л камере, увеличив E_{ig} до 10 кДж и даже более. Для лучшего понимания рекомендации ГОСТ приводим следующее пояснение.

Срабатывание энергоемкого ИЗ в 20-л камере наряду с увеличением надежности зажигания вызывает подъем начальной температуры аэровзвеси, причем тем больший, чем больше E_{ig} [11–14]. Если невзрывоопасная (здесь и далее — в нормальных условиях) пыль обладает показателем T_{ai} , то зна-

¹ E1226–12A. Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds.

² Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D. Scaling up metal dusts deflagrations severity // Proceedings of the Twelfth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. Soesterberg, Netherlands, 2018. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:186f151e-8fd9-4bca-90d0-d597901aa282>

³ ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

чительное увеличение E_{ig} в 20-л камере приводит к взрыву этой пыли, «подогретой» в процессе тестирования (эффект «overdrive» [4]). Естественно, что такой взрыв имеет особенности (далее — признаки невзрывоопасности пыли), отличающие этот взрыв от взрыва пыли, которая взрывоопасна в нормальных условиях обращения. Описание признаков невзрывоопасности пыли получено из анализа результатов тестирования аэровзвеси заведомо невзрывоопасного антрацита, которая взрывалась в 20-л камере с энергоемким ИЗ [15]. Таким образом, в зависимости от наличия или отсутствия упомянутых признаков у взрыва пыли в 20-л камере, пыль сочтут невзрывоопасной или взрывоопасной соответственно, полагая возможным не проводить для этой пыли крупномасштабных огневых испытаний.

Следуя рекомендациям ГОСТ², в настоящей работе проведено исследование аэровзвеси свинцовой пыли, демонстрирующее ее взрывоопасность при тестировании в 20-л камере с целью обнаружить в результатах данного исследования признаки невзрывоопасности свинцовой пыли в нормальных условиях обращения.

Объект исследования и экспериментальная установка

Пыль свинцового концентрата с содержанием свинца не менее 99 % (масс.) исследована в 20-л взрывной камере Сивека [16]. Распределение частиц образца по размерам определялось с использованием Analysette 22 Microtec plus. Результаты данного исследования приводятся в табл. 1.

Автоматизированная процедура единичного опыта состояла из последовательности следующих основных операций: частичной откачки камеры (до абсолютного давления 40 кПа), распыления импульсом сжатого воздуха навески пыли в объеме камеры с одновременным восстановлением атмосферного давления (около 100 кПа), зажигания образовавшейся аэровзвеси пиротехническим зарядом с запасом химической энергии 10 кДж фирмы Simex [17] и регистрации зависимости развивающегося в камере давления P от времени t . Методика единичного опыта подробно описана в [16]

Таблица 1. Гранулометрический состав частиц свинца
Table 1. Granulometric composition of lead particles

Фракция, мкм Fraction, microns	< 57,5	< 44,1	< 36,6	< 23,3	< 8,5	< 2,7	< 1,2	< 0,7
Содержание, % (масс.) Content, % (by weight)	99	95	90	75	50	25	10	5

и соответствует европейским стандартам^{4,5} определения максимального давления взрыва аэровзвеси P_m и максимальной скорости его нарастания $(dP/dt)_m$.

Экспериментальные результаты

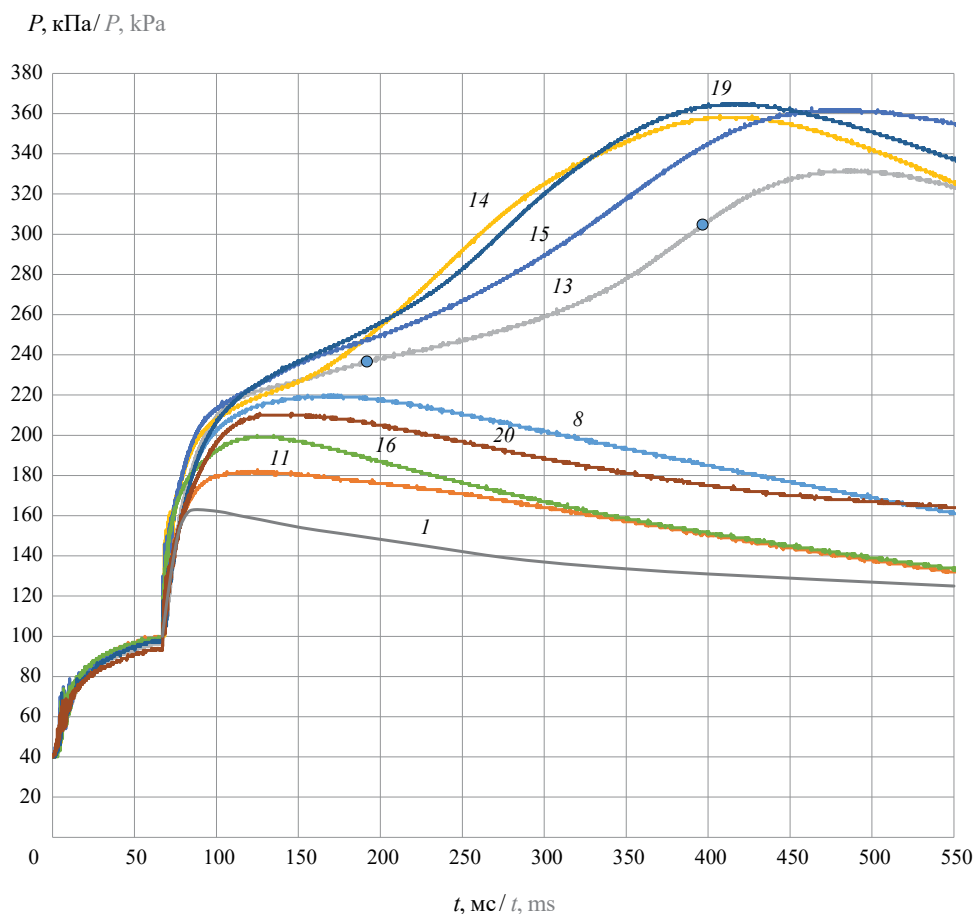
Результаты опытов, проведенных в рамках настоящей работы, представлены в табл. 2. В таблице приняты следующие обозначения: C_s — начальная концентрация пыли свинца в аэровзвеси; P_m — максимальное абсолютное давление, возникающее в камере на протяжении единичного опыта; $K_m = V^{1/3}(dP/dt)_m$ — нормированное значение максимальной скорости изменения давления в камере на протяжении единичного опыта; $V = 0,02 \text{ м}^3$ — объем камеры; φ — частота реализации взрыва аэровзвеси, представляющая отношение

⁴ EN 14034-1:2004+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds, January 2011.

⁵ EN 14034-2:2006+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds, January 2011.

Таблица 2. Результаты тестирования пыли свинца
Table 2. Lead dust test results

Номер опыта Experiment Number	C_s , г/м ³ C_s , g/m ³	P_m , кПа P_m , kPa	K_m , бар · м/с K_m , bar · m/s	Взрыв (+) / нет взрыва (-) / Explosion (+) / no explosion (-)	φ
1	0	163	...	...	...
2, 3, 4	250	От 180 до 210 From 180 to 210	...	—	0
5, 6, 7	500		...	—	0
8, 9, 10	750		...	—	0
11	1000	182	...	—	1/3
12	1000	196	...	—	
13	1000	335	1,44	+	
14	1250	360	2,01	+	2/3
15	1250	361	1,95	+	
16	1250	300	...	—	
17	1500	194	...	—	2/3
18	1500	357	1,17	+	
19	1500	365	1,33	+	
20, 21, 22	1750	От 190 до 210 From 190 to 210	...	—	0



Зависимости абсолютного давления P , кПа, в 20-л камере от времени t , с, для некоторых опытов из перечисленных в табл. 2. Номер зависимости совпадает с номером опыта. Жирными точками отмечены минимум и максимум производной dP/dt на графике 13

Dependences of absolute pressure P , kPa, in the 20-liter chamber on time t , s, for some experiments listed in the Table 2. The dependence number coincides with the number of the experiment. Bold dots mark the minimum and maximum of the dP/dt derivative in the graph 13

числа зарегистрированных взрывов к общему числу опытов для данной концентрации пыли; символ «...» означает отсутствие параметра; 1 бар = 100 кПа.

Характерные графики $P(t)$, полученные в опытах с пылью свинца, а также опыт № 1 с выгоранием ИЗ в отсутствие пыли приводятся на рисунке.

Обсуждение результатов

Представленные в табл. 2 результаты позволяют разделить все опыты со свинцовой пылью на две группы по величине P_m . В первую группу входят опыты со 2 по 12, 16, 17, 20, 21 и 22, для которых P_m принадлежит интервалу давлений от 80 до 120 кПа. Во второй группе, куда относятся опыты 13, 14, 15, 18 и 19, P_m принадлежит интервалу давлений от 230 до 265 кПа. Близость значений P_m внутри каждой из групп опытов и существенный разрыв между упомянутыми интервалами давлений демонстрируют качественное отличие процессов горения свинцовой пыли в опытах из разных групп, что отражено в пятой колонке (взрыв/нет взрыва) табл. 2. Опыты первой

группы выявляют локальное горение аэровзвеси вблизи пламени источника зажигания, т.е. отсутствие взрыва. Опыты второй группы выявляют взрыв пыли, охватывающий значительный объем аэровзвеси.

Отличие процессов горения для опытов из разных групп подтверждает различие восходящего участка зависимости $P(t)$. В опытах первой группы для этого участка $P(t)$ характерно монотонное снижение производной dP/dt , аналогичное тому, которое наблюдается в случае срабатывания ИЗ при отсутствии пыли (см. опыт 1). Для опытов второй группы на восходящем участке $P(t)$ присутствуют две точки перегиба (см. пример опыта 13 на рисунке), исключаящие монотонное изменение dP/dt и указывающие на двухэтапный характер горения свинцовой пыли. Нижний перегиб соответствует моменту достижения минимальной скорости изменения давления (dP/dt), что является особенностью проявления эффекта «overdrive» [15, 18]: завершается этап медленного развития горения, на котором происходит прогрев свежей аэровзвеси путем ее турбулентного перемеши-

вания с продуктами горения ИЗ [19]. Верхний перегиб относится к этапу быстрого развития взрыва и отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_m$, нормированное значение которой K_m весьма мало (не более $2,1 \text{ бар} \cdot \text{м/с}$; приводится в четвертой колонке табл. 2).

Диапазон взрывоопасных концентраций свинцовой пыли в использованных условиях тестирования (20-л камера, $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$) составил от 1000 до 1500 г/м^3 (см. колонку 5 (взрыв/нет взрыва) табл. 2). Во всем диапазоне взрывоопасных концентраций имеет место случайный характер проявления взрывоопасности у свинцовой пыли (см. колонку 6 табл. 2), который объясняется, по-видимому, следующими обстоятельствами:

- наличием разброса ($\pm 10 \%$) реальной энергии, выделяющейся при горении ИЗ [18];
- двухэтапным характером взрыва, включающим конкуренцию процессов, один из которых способствует росту горючести свинцовой пыли (прогрев свежей аэровзвеси), а другой снижает зажигательную способность нагретой области среды из-за уменьшения ее максимальной температуры.

Проявление взрывоопасности свинцовой пыли в 20-л камере при увеличении энергии ИЗ с $2,5 \text{ кДж}$ в работе [3] до 10 кДж в настоящей работе вызвано эффектом повышения начальной температуры аэровзвеси из-за притока тепловой энергии от срабатывающего ИЗ. При $T_0 \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P_0 \approx 100 \text{ кПа}$ аэровзвесь свинцовой пыли не распространяет пламя, на что указывает присутствие в результатах проведенного исследования «подогретой» аэровзвеси следующих трех признаков взрывобезопасности аэровзвеси в нормальных условиях обращения [15]: $K_m < 45 \text{ бар} \cdot \text{м/с}$; неустойчивость возникновения взрыва во всем диапазоне взрывоопасных концентраций пыли; присутствие двух точек перегиба на восходящем участке зависимости $P(t)$.

В завершение раздела отметим, что диапазон взрывоопасных концентраций свинцовой пыли в «подогретой» аэровзвеси (от 1000 до 1500 г/м^3) расположен заметно ниже стехиометрической концентрации свинцовой пыли (3600 г/м^3 [3]). Для объяснения этого результата учтем эмпирическое правило: с увеличением T_0 снижается минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) в аэровзвеси [7]. Из этого правила следует, что у невзрывоопасной в нормальных условиях свинцовой пыли МВСК $> 21 \%$ об. и возникновение взрывоопасности с увеличением T_0 носит поро-

вый характер, а именно, происходит при $T_0 \geq T_{cr}$, где T_{cr} — пороговая температура. Из-за теплоотдачи энергии ИЗ в пыль величина T_0 в «подогретой» аэровзвеси должна уменьшаться с ростом концентрации пыли C_s . Особенно заметным уменьшение T_0 происходит при значениях C_s , сопоставимых с плотностью воздуха ($\approx 1200 \text{ г/м}^3$). Поэтому разумно ожидать, что на верхнем пределе горения «подогретой» аэровзвеси свинца (около 1750 г/м^3) выполняется условие $T_0 = T_{cr}$, которое скорее всего соответствует бедной взвеси, подтверждая правомерность рассмотренного результата.

Оценка T_{cr} для аэровзвеси свинцовой пыли выходит за рамки настоящей работы. Для такой оценки целесообразна постановка специального эксперимента с прибором, подобным печи Годберга – Гринвальда [2], в объем реакционного сосуда которого встроен малокалорийный ИЗ. В таком приборе за величину T_{cr} разумно принять минимальную температуру реакционного сосуда, при которой распыляемая в нем свинцовая пыль способна воспламеняться от срабатывания встроенного источника зажигания.

Выводы

Исследован образец свинцовой пыли со средним размером частиц около $8,5 \text{ мкм}$ в 20-л взрывной камере Сивека с пиротехническим источником зажигания, имеющим запас энергии 10 кДж . Максимальное избыточное давление взрыва составило $\approx 150 \text{ кПа}$, индекс взрывопожароопасности составил около 2 бар м/с . Диапазон взрывоопасных концентраций пыли (от 1000 до 1500 г/м^3) расположен заметно ниже стехиометрической концентрации (3600 г/м^3).

Результаты исследования пыли имеют особенности, характерные для дисперсного материала, взрывобезопасного при нормальных условиях обращения (температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении 100 кПа): индекс взрывопожароопасности менее 45 бар м/с ; случайный характер проявления взрывоопасности во всем диапазоне концентраций пыли в аэровзвеси; двухэтапный характер развития взрыва, определяемый по наличию двух точек перегиба на зависимости давления в камере от времени в единичном опыте.

Регистрация взрывов свинцовой пыли обусловлена эффектом «overdrive» — предварительным нагревом аэровзвеси в опытах с использованием энергоемкого источника зажигания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jacobson M., Cooper A.R., Nagy J. Explosibility of metal powders. US Bureau of Mines. Report of investigations 6516. 1962. 25 p.

2. Dorsett H.G., Jacobson M., Nagy J., Williams R.P. Laboratory equipment and test procedures for evaluating explosibility of dusts. US Bureau of Mines. Report of investigations 5624. 1960. 21 p.
3. Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. Vol. 20 (4–6). Pp. 337–348. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.018
4. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ Chambers // Combustion Science and Technology. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
5. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
6. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J. E.M. Metal dusts explosion hazards and protection // Chemical Engineering Transactions. 2019. Vol. 77. Pp. 7–12. DOI: 10.3303/CET1977002
7. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003. 720 p.
8. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. No. 65. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. Perera I.E., Harris M.L., Sapko M.L. Examination of classified rock dust (treated and untreated) performance in a 20-L explosion chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. No. 62 (5). P. 103943. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103943
10. Portarapillo M., Trofa M., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of dust dispersion in the 1 m³ explosion vessel // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. No. 68. P. 104274. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104274
11. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions // Journal of Hazardous Materials. 1995. No. 42 (2). Pp. 177–186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Flammability limit measurements for dusts and gases : Ignition energy requirements and pressure dependences // Symposium (International) on Combustion. 1988. No. 21 (1). Pp. 303–313. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80258-3
13. Полетаев Н.Л. О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
15. Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31
16. Cesana C., Siwek R. Operating instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0. Birsfelden. Kühner AG. 2009.
17. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel // Sci. Tech/Energetic Materials. 2011. Vol. 72. No. 6. Pp.174–178.
18. Полетаев Н.Л. О взрывоопасности взрывов меламина // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing. Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels // Process Safety Progress. 2021. Vol. 40. Issue 4. Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249

REFERENCES

1. Jacobson M., Cooper A.R., Nagy J. *Explosibility of Metal Powders. US Bureau of Mines. Report of investigations 6516.* 1962; 25.
2. Dorsett H.G., Jacobson M., Nagy J., Williams R.P. *Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts. US Bureau of Mines. Report of investigations 5624.* 1960; 21.
3. Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2007; 20(4-6):337-348. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.018
4. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology.* 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213

5. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
6. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and protection. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 77:7-12. DOI: 10.3303/CET1977002
7. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. *Gulf Professional Publishing/Elsevier*. Boston, 2003; 720.
8. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 65:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. Perera I.E., Harris M.L., Sapko M.L. Examination of classified rock dust (treated and untreated) performance in a 20-L explosion chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62(5):103943. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103943
10. Portarapillo M., Trofa M., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of dust dispersion in the 1 m³ explosion vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104274. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104274
11. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1995; 42(2):177-186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*. 1988; 21(1):303-313. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80258-3
13. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
15. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.U. Features of anthracite dust explosion in 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31 (rus).
16. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden*. 2009.
17. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel. *Sci. Tech/Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178.
18. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels. *Process Safety Progress*. 2021; 40(4):289-295. DOI: 10.1002/prs.12249

Поступила 31.03.2024, после доработки 23.04.2024;

принята к публикации 05.06.2024

Received March 31, 2024; Received in revised form April 23, 2024;

Accepted June 5, 2024.

Информация об авторах

ПОЛЕТАЕВ Николай Львович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

САЗОНОВ Михаил Сергеевич, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Науч-

Information about the authors

Nikolay L. POLETAEV, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Mikhail S. SAZONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Indus-

ный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская область — Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

КОПТЕВ Михаил Юрьевич, и.о. заведующего лабораторией борьбы с пылью и пылевзрывозащиты, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская область — Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Вклад авторов:

Полетаев Н.Л. — научное руководство; обзор литературы; концепция исследования; написание текста; итоговые выводы.

Сазонов М.С. — проведение эксперимента.

Коптев М.Ю. — проведение эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

trial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RSCI: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

Mikhail Yu. KOPTEV, Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RSCI: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Contribution of the authors:

Poletaev N.L. — scientific guidance; literature review; research concept; writing the text; final conclusions.

Sazonov M.S. — conducting an experiment.

Koptev M.Yu. — conducting an experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 4. С. 13–21
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(4):13-21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 004.896

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.04.13-21>

Обнаружение и определение точного местоположения очага возгорания с использованием сверточной нейронной сети, панорамного изображения и 3D-модели объекта наблюдения

Андрей Александрович Евсиков, Илья Вадимович Самарин ✉

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При решении задачи по обеспечению пожарной безопасности на крупных объектах промышленности важно обеспечить наивысшую скорость реагирования на возникающие угрозы. В данной работе рассматривается новый метод обнаружения и определения точного местоположения очага возгорания в реальном времени, основанный на современных методах обработки изображений и искусственного интеллекта.
Цели и задачи. Целью работы является создание системы, способной обнаружить возгорание на панорамном изображении, и, основываясь на 3D-модели, определить координаты найденной угрозы.

Задачи работы:

- обучение CNN и ее адаптация для работы на панорамном изображении;
- разработка алгоритма определения пространственных координат найденного на изображении объекта.

Методы. В работе описывается схема предложенной системы. Рассматриваются методы обнаружения возгораний на изображении. Обосновывается выбор подхода с использованием сверточной нейронной сети. Рассматривается применение нейронной сети на панорамном изображении и описывается подход к выпрямлению искажений на изображении с целью повышения точности работы сети. Описывается метод совмещения 3D-модели с панорамным изображением и определения пространственных координат найденных возгораний.

Результаты и их обсуждение. В работе показаны результаты работы системы в виртуальной среде, где были сгенерированы возгорания. В среде эмулированы все ключевые компоненты системы, такие как панорамная камера и 3D-модель объекта. В проведенных экспериментах погрешность определения координаты возгорания составила порядка 20 см.

Выводы. В работе был рассмотрен новый подход к обнаружению возгораний с использованием компьютерного зрения. Была обучена нейросеть архитектуры YOLOv5, которая способна распознавать пламя и дым. Для снижения искажений применена стереографическая проекция. Был разработан и применен метод определения координат возгорания в пространстве посредством совмещения 3D-модели и панорамного изображения.

Ключевые слова: компьютерное зрение; обнаружение пожаров; обнаружение объектов в реальном времени; глубокое обучение; стереографическая проекция

Для цитирования: Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение и определение точного местоположения очага возгорания с использованием сверточной нейронной сети, панорамного изображения и 3D-модели объекта наблюдения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 13–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.13-21

✉ Самарин Илья Вадимович, e-mail: ivs@gubkin.ru

Detection and determination of the exact location of the fire centre using a convolutional neural network, panoramic image and 3D model of the observed object

Andrey A. Evsikov, Ilya V. Samarin ✉

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When solving the problem of ensuring fire safety at large industrial facilities, it is important to ensure the highest speed of response to emerging threats. This paper discusses a new method of detecting and determining the exact location of the fire centre in real time, based on modern methods of image processing and artificial intelligence.

Aims and Objectives. The aim of the work is to create a system capable of detecting fire in a panoramic image and, based on a 3D model, determining the coordinates of the detected threat.

Objectives of the work:

- CNN training and its adaptation to work in a panoramic image;
- development of an algorithm for determining the spatial coordinates of an object found in the image.

Methods. The paper describes the scheme of the proposed system. Methods for detecting fires in the image are discussed. The choice of the approach using a convolutional neural network is justified. The application of a neural network in a panoramic image is considered and an approach to straightening distortions in the image is described in order to improve the accuracy of the network. A method for combining a 3D model with a panoramic image and determining the spatial coordinates of found fires is described.

Results and Discussion. The work shows the results of the system in a virtual environment where fires were generated. The environment emulates all key components of the system, such as a panoramic camera and a 3D model of the object. In the experiments carried out, the error in determining the coordinates of the fire was about 20 cm.

Conclusions. The work examined a new approach to detecting fires using computer vision. A neural network of the YOLOv5 architecture was trained, which is capable of recognizing fire and smoke. To reduce distortion, stereographic projection was used. A method was developed and applied to determine the coordinates of fire in space by combining a 3D model and a panoramic image.

Keywords: computer vision; fire detection; real-time object detection; deep learning; stereographic projection

For citation: Evsikov A.A., Samarin I.V. Detection and determination of the exact location of the fire centre using a convolutional neural network, panoramic image and 3D model of the observed object. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):13-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.13-21 (rus).

✉ Ilya Vadimovich Samarin, e-mail: ivs@gubkin.ru

Введение

При обеспечении пожарной безопасности на крупных объектах, обладающих повышенным риском возникновения возгорания, таких как предприятия химической и нефтегазовой промышленности, склады и объекты энергетики, важнейшим фактором является скорость обнаружения и определения точного местоположения возникшей угрозы. Своевременное прибытие пожарной бригады в конкретное место очага возгорания позволяет значительно снизить потенциальный ущерб от возникшей угрозы.

В последние годы развитие систем искусственного интеллекта (ИИ) и, в частности, технологий компьютерного зрения позволяют находить новые подходы к решению такого рода задач.

В данной работе рассматривается новый метод обнаружения и определения точного местоположения очага возгорания. Его суть заключается в использовании сверточной нейронной сети (Convolutional Neural Network, CNN) на изображении с панорамной камеры, имеющей угол обзора 360 градусов, для обнаружения возгораний и дальнейшего определения их местоположения путем совмещения найденного на изображении объекта с 3D-моделью наблюдаемого камерой пространства.

Целью работы является создание системы, способной обнаружить возгорание на панорамном изображении, и, основываясь на 3D-модели, определить координаты найденной угрозы.

Задачи работы:

- обучение CNN и ее адаптация для работы на панорамном изображении;
- разработка алгоритма определения пространственных координат найденного на изображении объекта.

Методы

Схема рассматриваемой в работе системы представлена на рис. 1.

Принцип работы системы заключается в следующем. На первом этапе изображение с панорамной камеры видеонаблюдения преобразуется в проекции и обрабатывается с помощью CNN, которая определяет наличие и местоположение возгорания на изображении. Далее панорамное изображение совмещается с 3D-моделью, после чего координаты обнаруженных объектов на панорамном изображении проецируются на совмещенной с изображением 3D-модели. В результате работы системы формируются пространственные координаты обнаруженного возгорания.

Для обнаружения возгорания на изображении в данной работе используется подход с использованием CNN. Данный подход является на сегодняшний день наиболее актуальным по сравнению с другими методами обнаружения возгорания на изображении.

Благодаря активному развитию сверточных нейронных сетей в области обработки изображений их эффективность в обнаружении огня стала превосходить такие методы, как анализ спектра в различных цветовых пространствах, таких как RGB (Red, Green, Blue) в работах [1, 2], HSV (Hue (Тон), Saturation (Насыщенность), Value (значение)) в работе [3]. Кроме этого, применялись методы анализа спектра в цветоразностных пространствах, например Lab, YCbCr и YUV в работах [4–6] соответственно.

В применении CNN для обнаружения возгорания существуют различные подходы. Кроме специализированных архитектур для детектирования объектов на изображении для этого могут использоваться архитектуры, предназначенные для классификации

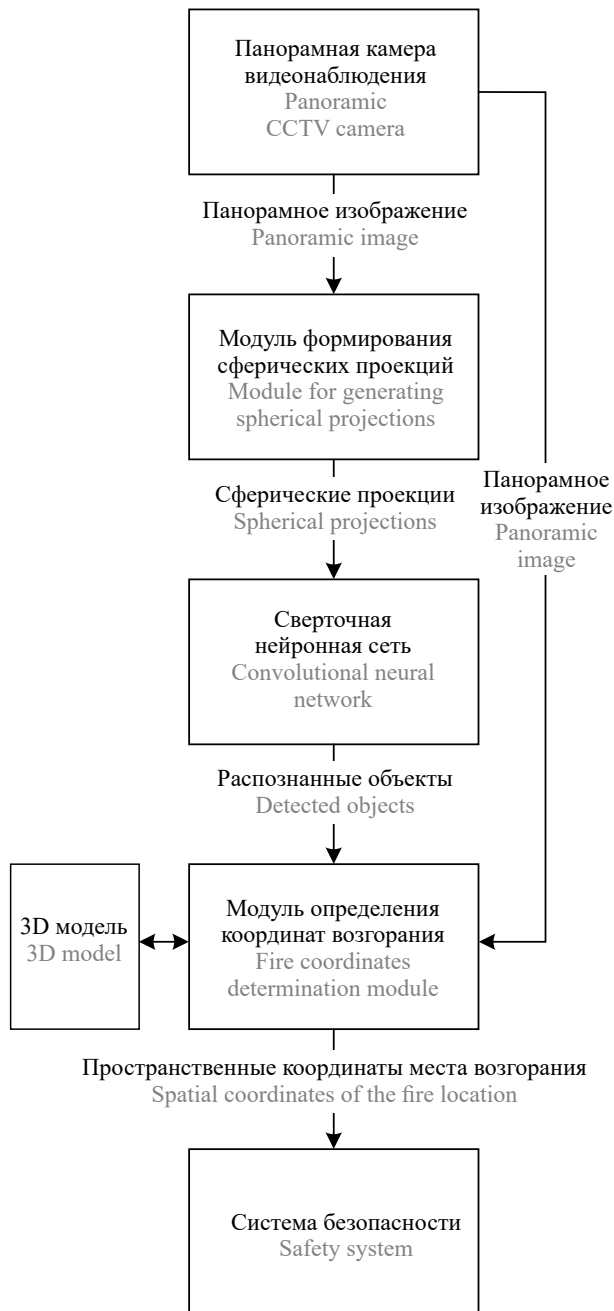


Рис. 1. Схема системы определения координат возгорания с помощью панорамного изображения и 3D-модели
Fig. 1. Scheme of the fire detection system using the panoramic image and the 3D model

изображения, как в работах [7–9], или архитектуры для сегментации, как в работе [10].

Однако наиболее широкое распространение в области обнаружения объектов на изображении получили CNN, специально разработанные для детектирования. Это постепенно выходящие из использования двухэтапные (two-stage) детекторы, такие как R-CNN [11], Mask R-CNN [12], Pyramid Networks [13], и наиболее современные одноэтапные (single-stage) архитектуры, такие как YOLO [14], SSD [15], RetinaNet [16].

В данной работе предлагается использовать архитектуру YOLOv5 [17], так как она показывает себя наилучшим образом среди других архитектур в плане точности и скорости работы, как это было показано в нашей работе [18].

Важной особенностью применения CNN в данной работе является использование панорамного изображения. Такие изображения охватывают полностью все пространство вокруг камеры, имея горизонтальный угол охвата 360° и вертикальный 180°. Такие изображения имеют важное для реализации рассматриваемой в работе системы свойство, что каждая горизонтальная и каждая вертикальная линии на изображении соответствуют определенному угловому отклонению от середины изображения. Таким образом, панорамное изображение является равнопромежуточной цилиндрической проекцией.

У такой проекции есть также и негативная особенность, заключающаяся в искажениях, сила которых увеличивается по мере приближения к верхнему и нижнему краям изображения. Из-за таких искажений точность работы CNN, обученной на стандартных изображениях без искажений, будет значительно снижена. Поэтому для работы на панорамном изображении необходимо выпрямлять искажения, чтобы приблизить параметры входного изображения сети к привычным для нее.

В работах [19, 20] предлагается использование сферической проекции. Суть подхода заключается в разбиении целого панорамного изображения на более малые участки с пересечением, после чего к ним применяется сферическое проецирование, в результате которого получают изображения, приспособленные для работы с CNN. На каждом участке определяются объекты, после чего полученные результаты обратно проецируются на исходное панорамное изображение с удалением дублей в местах пересечения.

В нашей работе [21] для выпрямления искажений используется стереографическая проекция. Она является частным вариантом сферической проекции и соответствует следующей формуле:

$$\begin{aligned} x &= \frac{R+1}{1+\cos\alpha} \sin\alpha; \\ y &= \frac{R+1}{1+\cos\beta} \sin\beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y — координаты проецируемой точки на плоскости;

R — радиус сферы;

α — горизонтальный угол точки на сфере;

β — вертикальный угол точки на сфере.

Для того чтобы полностью спроецировать данным методом панорамное изображение, необходимо использование как минимум 4 изображений, центры

которых соответствуют углам α , равным 0, 90, 180 и -90° . В итоге обработка панорамного изображения осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) по панорамному изображению строятся четыре стереографические проекции;
- 2) на каждой проекции отрабатывает нейронная сеть, обнаруживая возгорания;
- 3) полученные объекты с помощью обратного преобразования переносятся на исходную панораму;
- 4) дубли на местах пересечения проекций удаляются.

Для того чтобы определить координаты полученных объектов в пространстве, существуют разные подходы. Например, есть не очень точные, но не требующие дополнительных элементов, таких как 3D-модели и облака точек, методы, основанные на триангуляции по нескольким панорамным изображениям, сделанным с разных позиций. Такой метод используют в работе [22]. Суть предложенного авторами подхода заключается в сегментации объектов на нескольких панорамных изображениях, сделанных в соседних точках, с использованием CNN, после чего в пространстве для каждого найденного объекта строится луч, исходящий из места съемки в направлении объекта. Места, в которых лучи похожих объектов с разных панорам пересекаются, принимаются за координаты найденного объекта.

Несмотря на приемлемую заявленную авторами точность в 2 метра, данный метод не очень применим к задаче, рассматриваемой в этой работе, так как для этого потребуется избыточное покрытие панорамными камерами площади наблюдения, с большим пересечением зон наблюдения, что нивелирует одно из основных преимуществ панорамных камер, заключающееся в покрытии большей площади при меньших точках установки оборудования.

Другой намного более точный метод — это определение координат объекта путем совмещения панорамного изображения с 3D-моделью окружения. 3D-моделью при решении такого рода задач обычно выступает облако точек, полученное путем сканирования с использованием LiDAR.

Подход с облаками точек наиболее обоснован для задач, где необходима классификация самих точек, например формирование 3D-карт, как, например, в работе [23]. В данной работе применяется сегментация панорамного изображения с использованием CNN, после чего изображение делится на небольшие участки, которые проецируются на облако точек, в результате чего класс пикселей переносится на точки.

Подобный метод частично подходит для рассматриваемой системы, однако стоит отметить отличия в решаемых задачах. По большей части в существующих работах подход с наложением 3D-моделей

и панорамного изображения используется для определения параметров самого окружения и является статической задачей. В свою очередь задача обнаружения возгорания решается в динамике, и окружение, в котором она решается, определять не нужно, так как цель — найти возникающие в нем объекты.

В соответствии с этим, в данной работе предполагается, что система может работать как с облаком точек, так и с низкополигональной 3D-моделью окружения. Облако точек является избыточным, так как все, что нужно определить системе, это координата места, где было обнаружено возгорание, однако его использование также возможно.

Возможность совмещения панорамного изображения с 3D-моделью обуславливается равнопромежуточной цилиндрической проекцией, описанной ранее. Из нее следует, что каждый пиксель такого изображения соответствует четырехгранному углу с вершиной в точке объектива панорамной камеры, и у которого все плоские углы прямые. Каждый такой угол определяется четырьмя значениями: угловой диапазон по горизонтали (α_1 , α_2) и угловой диапазон по вертикали (β_1 , β_2). Определить эти значения для пикселя можно с помощью формул:

$$\begin{aligned}\alpha_1(i) &= \left(i - \frac{W}{2}\right) \cdot \frac{360}{W}; \\ \alpha_2(i) &= \alpha_1(i) + \frac{360}{W}; \\ \beta_1(j) &= \left(j - \frac{H}{2}\right) \cdot \frac{180}{H}; \\ \beta_2(j) &= \beta_1(j) + \frac{180}{H},\end{aligned}\tag{2}$$

где i — горизонтальный индекс пикселя;

W — горизонтальное разрешение панорамного изображения;

j — вертикальный индекс пикселя;

H — вертикальное разрешение панорамного изображения.

Используя формулу (2), можно определить угловые диапазоны любого прямоугольного сектора с координатами (i_1, i_2, j_1, j_2) , для которого горизонтальный угловой сектор равен $(\alpha_1(i_1), \alpha_2(i_2))$, а вертикальный $(\beta_1(j_1), \beta_2(j_2))$. Таким образом можно получить угловой диапазон для любого найденного с помощью CNN объекта на панорамном изображении.

Полученный четырехгранный угол находится в локальной системе координат панорамного снимка, где точка отчета — это объектив камеры. Для того чтобы совместить полученный угловой сектор с 3D-моделью, необходимо свести все к одной системе координат. Для вычислений удобнее приводить 3D-

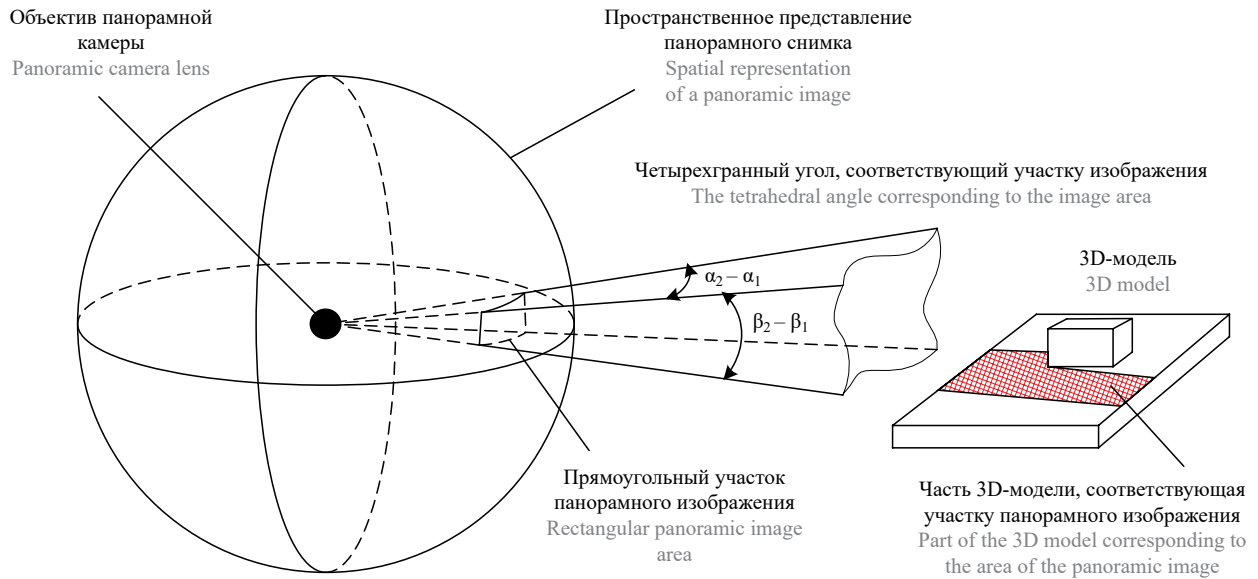


Рис. 2. Схема совмещения участка панорамного изображения с соответствующей частью 3D-модели
Fig. 2. Scheme of combining the section of the panoramic image with the corresponding part of the 3D model

модель к системе координат панорамного изображения. Для этого необходимо знать координаты объектива в системе координат 3D-модели и углы наклона

камеры. По этим параметрам можно определить новые координаты вершин 3D-модели или облаков точек относительно панорамной камеры с помощью формул:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n & z'_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \times R - (x_0 \quad y_0 \quad z_0), \quad (3)$$

где R — матрица поворота;

α, β, γ — углы Эйлера камеры относительно осей x, y, z 3D-модели соответственно;

x'_i, y'_i, z'_i — координаты i -й точки 3D-модели в системе координат панорамы;

x_i, y_i, z_i — координаты i -й точки 3D-модели в исходной системе координат;

x_0, y_0, z_0 — координаты камеры в исходной системе координат.

В результате проделанных преобразований можно определить, какая часть 3D-модели соответствует каждому пикселю или прямоугольному участку панорамного изображения, впрочем, благодаря дискретности изображения, можно определить зону, соответствующую любому произвольному по форме набору пикселей. Иллюстрация данного принципа представлена на рис. 2.

Чем больше угловой сектор найденного с помощью CNN возгорания, тем сложнее точно определить

место на 3D-модели, которое является источником возгорания, так как в зону может попадать достаточно большая площадь. Поэтому для определения координат возгорания требуется сузить зону, которая определяется на 3D-модели. При достаточно небольшом участке, относящемся к одному обособленному геометрическому объекту, возможно определить координату как центр объема полученной части 3D-модели.

Для того чтобы это сделать, в качестве углового сектора можно брать не все возгорание, а только узкую часть под ним. После чего необходимо в случае использования 3D-модели откинуть лишние попавшие участки геометрии, оставив самый крупный, а для облака точек провести кластеризацию и оставить самый крупный кластер точек. Иллюстрация этого процесса приведена на рис. 3.

В результате можно определить координату найденного возгорания, взяв центр объема полученной

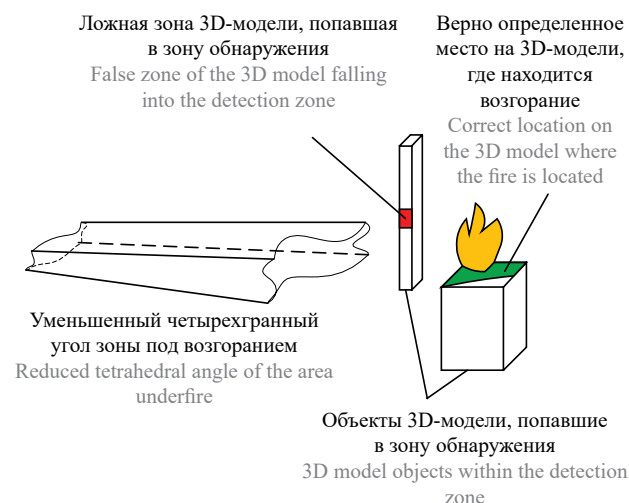


Рис. 3. Схема определения положения возгорания в 3D-пространстве
Fig. 3. Scheme of determining the position of the fire in 3D space

части 3D-модели. Полученная координата будет в системе координат панорамы, для перевода ее в исходную систему координат 3D-модели необходимо произвести обратное формуле (3) преобразование.

Результаты и их обсуждение

CNN архитектуры YOLOv5 обучена с использованием алгоритма адаптивного определения момента (Adaptive moment estimation, Adam) при 100 полных проходах по обучающей выборке, состоящей из вручную размеченных изображений пожаров. При обучении применяются методы облегчения нейронной сети, такие как прореживание фильтров (filter pruning) с показателем прореживания 20 % и квантизация (quantization).

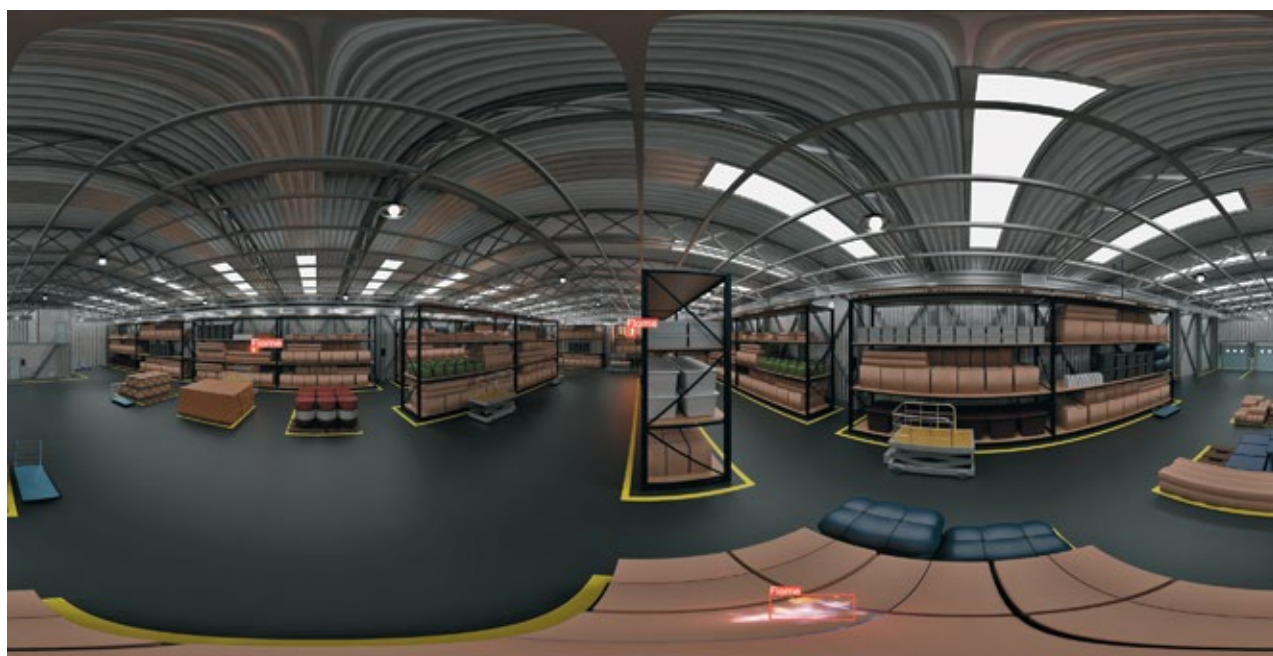


Рис. 4. Пример итогового результата работы CNN на панорамном изображении
Fig. 4. Example of CNN's final result in the panoramic image



Рис. 5. Найденная на 3D-модели точка возгорания
Fig. 5. Fire point found on the 3D model

Для экспериментов была создана виртуальная среда, в которой эмулируется панорамная камера, и в произвольном месте можно расположить виртуальное пламя.

На рис. 4 представлено панорамное изображение, на которое наложены обнаруженные на проекциях возгорания.

К полученным возгораниям, найденным на панорамном изображении, применяется алгоритм определения положения на 3D-модели. Результат работы на возгорании, расположенном по центру рис. 4, представлен на рис. 5. Положение, определенное системой, обозначается красной сферой.

В проведенных экспериментах погрешность определения местоположения составила около 20 см, однако она может сильно варьироваться в зависимости от сложности геометрии модели в районе возгорания.

Выводы

В работе был рассмотрен новый подход к обнаружению возгораний с использованием компьютерного зрения. Была обучена CNN архитектуры YOLOv5, которая способна распознавать пламя и дым. Для корректной работы нейронной сети на панорамном изображении с искажениями к нему в работе предлагается применять стереографическую сферическую проекцию, призванную снизить уровень искажений.

Для определения координаты полученных возгораний в пространстве был разработан алгоритм, позволяющий определять положение найденного на панорамном снимке возгорания на 3D-модели или на облаке точек.

Разработанная система была проверена в смоделированной для экспериментов виртуальной среде, где она доказала свою работоспособность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zaman T., Hasan M., Ahmed S., Ashfaq S. Fire detection using computer vision // IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). 2018. Pp. 356–359. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623842
2. Manjunatha K., Mohana H., Vijaya P. Implementation of computer vision based industrial fire safety automation by using neuro-fuzzy algorithms // I.J. Information Technology and Computer Science. 2015. Vol. 4. Pp. 14–27. DOI: 10.5815/ijitcs.2015.04.02
3. Qi X., Ebert J. A computer vision-based method for fire detection in color videos // International Journal of Imaging. 2009. No. 2 (9). Pp. 22–34.
4. Ба Хала А.М.А. Об обнаружении пожаров на изображениях земной поверхности в цветовой модели LAB // Экономика. Информатика. 2021. № 48 (4). С. 831–842. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-831-842
5. Celik T., Hasan D. Fire detection in video sequences using a generic color model // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44. No. 2. Pp. 147–158. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.05.005
6. Marbach G., Markus L., Thomas B. An image processing technique for fire detection in video images // Fire Safety Journal. 2006. Vol. 41. No. 4. Pp. 285–289. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.02.001
7. Zhang Q., Xu J., Xu L., Guo H. Deep convolutional neural networks for forest fire detection // Proceedings of the 2016 International Forum on Management, Education and Information Technology Application. 2016. Pp. 568–575. DOI: 10.2991/ifmeita-16.2016.105
8. Frizzi S., Kaabi R., Bouchouicha M., Ginoux J.M., Moreau E., Fnaiech F. Convolutional neural network for video fire and smoke detection // IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016. Pp. 877–882. DOI: 10.1109/iecon.2016.7793196
9. Muhammad K., Ahmad J., Mehmood I., Rho S., Baik S.W. Convolutional neural networks based fire detection in surveillance Videos // IEEE Access, 2018. Vol. 6. Pp. 18174–18183. DOI: 10.1109/access.2018.2812835
10. Li M., Zhang Y., Mu L., Xin J., Yu Z., Jiao S. et al. A real-time fire segmentation method based on a deep learning approach // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55. Issue 6. Pp. 145–150. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.120
11. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. Pp. 580–587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81
12. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017. Pp. 2980–2988. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322
13. Lin T., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. Pp. 936–944. DOI: 10.1109/CVPR.2017.106
14. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: unified, real-time object detection // CVPR. 2016. Pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91
15. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy Ch., Reed S., Fu Ch.-Ya. et al. SSD: single shot multibox detector // Computer Vision — ECCV Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9905. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2

16. Lin T., Goyal P., Girshick R., He K., Dollar P. Focal loss for dense object detection // 2020 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. Vol. 42. No. 2. Pp. 318–327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826
17. Wang C., Bochkovskiy A., Liao H. Scaled-YOLOv4: scaling cross stage partial network // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. Pp. 13024–13033. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01283
18. Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 32 (5). С. 40–48. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.40-48
19. Yang W., Qian Y., Kämäräinen J.-K., Cricri F., Fan L. Object detection in equirectangular panorama // 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Beijing, China, 2018. Pp. 2190–2195. DOI: 10.1109/ICPR.2018.8546070
20. Deng F., Zhu X., Ren J. Object detection on panoramic images based on deep learning // 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Nagoya, Japan, 2017. Pp. 375–380. DOI: 10.1109/ICCAR.2017.7942721
21. Евсиков А.А., Самарин И.В. Распознавание возгораний на панорамном изображении с использованием сверточной нейронной сети // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2023. № 12 (605). С. 5–10. DOI: 10.33285/2782-604X-2023-12(605)-5-10
22. Krylov V.A., Kenny E., Dahyot R. Automatic discovery and geotagging of objects from street view imagery // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 5. DOI: 10.3390/rs10050661
23. Babahajiani P., Fan L., Kämäräinen J.K. Urban 3D segmentation and modelling from street view images and LiDAR point clouds // Machine Vision and Applications. 2017. No. 28. Pp. 679–694. DOI: 10.1007/s00138-017-0845-3

REFERENCES

1. Zaman T., Hasan M., Ahmed S., Ashfaq S. Fire detection using computer vision. *IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. 2018; 356-359. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623842
2. Manjunatha K., Mohana H., Vijaya P. Implementation of computer vision based industrial fire safety automation by using neuro-fuzzy algorithms. *I.J. Information Technology and Computer Science*. 2015; 4:14-27. DOI: 10.5815/ijitcs.2015.04.02
3. Qi X., Ebert J. A computer vision-based method for fire detection in color videos. *International Journal of Imaging*. 2009; 2(9):22-34.
4. Ba Hala A.M.A. Fire detection on earth's surface images in the LAB color model. *Economika. Informatsionnyye tehnologii/Economics. Information technologies*. 2021; 48(4): 831-842. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-831-842 (rus).
5. Celik T., Hasan D. Fire detection in video sequences using a generic color model. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(2):147-158. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.05.005
6. Marbach G., Markus L., Thomas B. An image processing technique for fire detection in video images. *Fire Safety Journal*. 2006; 41(4):285-289. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.02.001
7. Zhang Q., Xu J., Xu L., Guo H. Deep convolutional neural networks for forest fire detection. *Proceedings of the 2016 International Forum on Management, Education and Information Technology Application*. 2016; 568-575. DOI: 10.2991/ifmeita-16.2016.105
8. Frizzi S., Kaabi R., Bouchouicha M., Ginoux J.M., Moreau E., Fnaiech F. Convolutional neural network for video fire and smoke detection. *IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2016; 877-882. DOI: 10.1109/iecon.2016.7793196
9. Muhammad K., Ahmad J., Mehmood I., Rho S., Baik S.W. Convolutional neural networks based fire detection in surveillance videos. *IEEE Access*. 2018; 6:18174-18183. DOI: 10.1109/access.2018.2812835
10. Li M., Zhang Y., Mu L., Xin J., Yu Z., Jiao S. et al. A real-time fire segmentation method based on a deep learning approach. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(6):145-150. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.120
11. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014; 580-587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81
12. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017; 2980-2988. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322
13. Lin T., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017; 936-944. DOI: 10.1109/CVPR.2017.106
14. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: unified, real-time object detection. *CVPR*. 2016; 779-788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91
15. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy Ch., Reed S., Fu Ch.-Ya. et al. SSD: single shot multibox detector. *Computer Vision — ECCV Lecture Notes in Computer Science*. 2016; 9905. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2

16. Lin T., Goyal P., Girshick R., He K., Dollar P. Focal loss for dense object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020; 42(2):318-327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826
17. Wang C., Bochkovskiy A., Liao H. Scaled-YOLOv4: Scaling cross stage partial network. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021; 13024-13033. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01283
18. Evsikov A.A., Samarin I.V. Detection of fires at technological facilities using convolutional neural network. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):40-48. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05. 40-48 (rus).
19. Yang W., Qian Y., Kämäräinen J.-K., Cricri F., Fan L. Object detection in equirectangular panorama. *24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. Beijing, China, 2018; 2190-2195. DOI: 10.1109/ICPR.2018.8546070
20. Deng F., Zhu X., Ren J. Object detection on panoramic images based on deep learning. *3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. Nagoya, Japan, 2017; 375-380. DOI: 10.1109/ICCAR.2017.7942721
21. Evsikov A.A., Samarin I.V. Fire recognition in panoramic images using convolutional neural network. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK/Automation and informatization of the fuel and energy complex*. 2023; 12(605):5-10. DOI: 10.33285/2782-604X-2023-12(605)-5-10 (rus).
22. Krylov V.A., Kenny E., Dahyot R. Automatic discovery and geotagging of objects from street view imagery. *Remote Sensing*. 2018; 10(5). DOI: 10.3390/rs10050661
23. Babahajiani P., Fan L., Kämäräinen J.K. Urban 3D segmentation and modelling from street view images and LiDAR point clouds. *Machine Vision and Applications*. 2017; 28:679-694. DOI: 10.1007/s00138-017-0845-3

Поступила 23.05.2024, после доработки 13.06.2024;

принята к публикации 01.07.2024

Received May 23, 2024; Received in revised form June 13, 2024;

Accepted July 1, 2024

Информация об авторах

ЕВСИКОВ Андрей Александрович, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 1211560; ORCID: 0009-0007-4974-7948; e-mail: andreyev4@gmail.com

САМАРИН Илья Вадимович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Вклад авторов:

Евсиков А.А. — концепция исследования; проведение экспериментов; написание исходного текста.

Самарин И.В. — научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Andrey A. EVSIKOV, Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RSCI: 1211560; ORCID: 0009-0007-4974-7948; e-mail: andreyev4@gmail.com

Ilya V. SAMARIN, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RSCI: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Contribution of the authors:

Evsikov A.A. — the concept of the study; conducting experiments; writing the source text.

Samarin I.V. — scientific guidance; revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования

Ирина Николаевна Пожаркова^{1,2} ✉

¹ Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Красноярский край, г. Железнодорожск, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснование безопасности эксплуатации подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов требует в том числе оценки огнестойкости горной породы, в толще которой она сооружается. При этом выбор основных параметров соответствующих огневых испытаний определяется температурным режимом, а также длительностью нагрева горной породы при пожаре. Одним из эффективных способов оценки указанных факторов в условиях, когда отсутствует возможность проведения натурального эксперимента или создания полномасштабной физической модели проектируемого объекта, является компьютерное моделирование динамики пожара.

Цель работы заключается в оценке температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории с учетом влияния геометрических параметров и глубины заложения горизонтальной горной выработки, характеристик используемой системы вентиляции, горючей нагрузки, теплофизических свойств минералов, ограждающих свободное пространство.

Методы. Для моделирования динамики пожара в работе применяется программная платформа FDS, предназначенная для проведения соответствующих расчетов. Исследование влияния различных факторов на результаты выполняется путем модификаций базовой модели, обоснование и основные настроечные параметры которых представлены в соответствующем разделе.

Результаты и их обсуждение. На основе серии компьютерных экспериментов с различными настроечными параметрами модели было установлено, что существенное влияние на результаты расчета оказывают: глубина заложения горизонтальной выработки, расход энергии на нагрев горной породы, параметры используемой системы вентиляции, а также в отдельных случаях размеры ячеек расчетной сетки.

Выводы. На основе анализа результатов моделирования был выявлен ряд особенностей объекта исследования, которые следует учитывать при проведении соответствующих компьютерных экспериментов и натурных испытаний. Разработанную компьютерную модель можно применять для оценки эффективности систем противопожарной защиты на объекте, исследования прогрева ограждений при различных сценариях пожара. Полученные по результатам моделирования параметры температурного режима при пожаре можно использовать для проведения огневых испытаний образцов горных пород, составляющих ограждения сооружений подземного комплекса.

Ключевые слова: моделирование пожара; вычислительная гидродинамика; FDS; расчетные сетки; тоннель; горная выработка; тепловое воздействие

Благодарности. Автор выражает признательность красноярскому филиалу ИБРАЭ РАН за оказанную помощь при проведении данного исследования и предоставленные материалы.

Для цитирования: Пожаркова И.Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 22–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.22-35

✉ Пожаркова Ирина Николаевна, e-mail: pozharikova@mail.ru

Investigation of fire temperature regime in an underground research laboratory based on numerical modelling

Irina N. Pozharkova^{1,2} ✉

¹ Siberian Fire and Rescue Academy of Emercom of Russia, Krasnoyarsk Region, Zheleznogorsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Justification of safety of operation of an underground research laboratory for the final isolation of radioactive waste requires, among other things, an assessment of the fire resistance of the rock in which it is constructed. In this case, the choice of the main parameters of the corresponding fire tests is determined by the temperature regime, as well as the duration of heating of the rock during the fire. One of the effective ways to assess these factors, in conditions where there is no possibility of conducting a full-scale experiment or creating a full-scale physical model of the designed object, is computer modelling of fire dynamics.

Aims and objectives. The aim of the work is to assess the temperature regime of the fire in an underground research laboratory, taking into account the influence of geometric parameters and the depth of horizontal mine opening, the characteristics of the ventilation system used, the combustible load, and the thermophysical properties of the minerals enclosing the free space.

Methods. To simulate fire dynamics, the work uses the FDS software platform, designed to carry out the corresponding calculations. The study of the influence of various factors on the results is carried out by modifying the basic model, the rationale and main tuning parameters of which are presented in the corresponding section.

Results and discussion. Based on a series of computer experiments with various tuning parameters of the model, it was found that the calculation results are significantly influenced by: the depth of the horizontal excavation, the energy consumption for heating the rock, the parameters of the ventilation system used, and also, in some cases, the dimensions of the calculation grid cell.

Conclusions. Based on the analysis of the modelling results, a number of features of the research object were identified that should be taken into account when conducting appropriate computer experiments and full-scale tests. The developed computer model can be used to assess the effectiveness of fire protection systems at the facility and study the heating of enclosures under various fire scenarios. The parameters of the temperature regime during the fire obtained from the modelling results can be used to conduct fire tests of rock samples that make up the enclosures of the underground complex structures.

Keywords: fire modelling; CFD; FDS; computational grids; tunnel; mining; excavation; thermal effect

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the Krasnoyarsk branch of the Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences for the assistance provided during this research and the materials provided.

For citation: Pozharkova I.N. Investigation of fire temperature regime in an underground research laboratory based on numerical modelling. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):22-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.22-35 (rus).

✉ Irina Nikolaevna Pozharkova, e-mail: pozharkova@mail.ru

Введение

Создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) является одним из первых этапов сооружения объекта глубинной изоляции радиоактивных отходов для обоснования безопасности захоронения¹. ПИЛ включает горизонтальные выработки длиной 147 м и сечением около 40 м², расположенные на глубине 450–525 м в массиве горной породы Енисейского участка, соединенные между собой и с поверхностью системой вертикальных стволов и скважин [1].

Анализ возможных аварийных ситуаций на объекте показал, что существует вероятность возникновения пожара, в том числе, в комплексе подземных сооружений. Для подтверждения безопасности эксплуатации объекта необходима оценка огнестойкости горной породы, составляющей ограждение подземного комплекса. Выбор температур при про-

ведении огневых испытаний образцов должен быть обоснован вероятными значениями температуры газовой среды при пожаре в ПИЛ, а также длительностью нагрева горной породы. На данные факторы, помимо скорости тепловыделения, определяемой свойствами горючей нагрузки, существенное влияние будут оказывать геометрия пространства ПИЛ и особенности газообмена выработок подземного комплекса.

Современные технологии исследования динамики пожаров включают компьютерное моделирование наблюдаемых при горении физических процессов, результаты которого используются как в научных работах [2–23], так и в обосновании соответствия объектов требованиям и нормам пожарной безопасности согласно отечественным^{2, 3} или зару-

¹ Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1 // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»: сайт. URL: https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

² Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 // КонсультантПлюс: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/ (дата обращения: 01.03.2024).

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140 // КонсультантПлюс: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_442656/ (дата обращения: 01.03.2024).

бежным^{4, 5} методикам. Подобный подход является безальтернативным, когда предметом исследования является пожар в проектируемом сооружении, в котором невозможно провести натурные испытания или создать для него полномасштабную физическую модель [24]. Моделирование пожара в ПИЛ с применением актуальных верифицированных методик позволит выявить возможные диапазоны изменения параметров газовой среды в результате возгорания в подземном комплексе.

Целью работы, которой посвящена настоящая статья, являлось проведение на основе компьютерного моделирования оценочного расчета температурного режима пожара с учетом: геометрических параметров ПИЛ, глубины заложения соответствующих горных выработок, расположения и интенсивности вентиляции, характеристик горючей нагрузки, теплофизических свойств горной породы.

ПИЛ включает подземные горизонтальные горные выработки, длина прямолинейного участка которых (147 м) значительно превышает размеры поперечного сечения ($5,95 \times 7,25$ м)¹. По геометрическим характеристикам выработки наиболее близки к тоннельным сооружениям со сводчатой формой верхней части и вертикальными стенками (рис. 1).

В отечественных и зарубежных исследованиях, посвященных моделированию пожаров в тоннелях транспортной инфраструктуры [24], в первую очередь рассматриваются вопросы обеспечения безопасности эвакуирующихся людей, участников тушения пожара и аварийно-спасательных работ на основе анализа распространения опасных факторов пожара [2–4, 6–8, 10, 21]. Ряд авторов [2, 7, 10–13, 15, 17, 18, 20–23] обосновывают целесообразность применения компьютерного моделирования для проверочных рас-

четов систем вентиляции и пожаротушения в тоннелях. Также следует выделить некоторые работы [5, 8–10], в которых представлены результаты исследования возможности потери несущей способности строительными конструкциями тоннелей вследствие нагрева при пожаре.

Большинство специалистов [3–7, 9, 10, 13–17, 19, 21–23] для моделирования пожаров используют методы вычислительной гидродинамики (CFD) и реализующие их программные средства, в том числе FDS [5, 6, 9, 10, 13, 17, 19, 21], Fluent [15, 17, 23], CFX [16], SOFIE [3, 4, 7], JASMINE [14]. CFD-модели, предназначенные для расчета тепло-массопереноса при горении, основаны на численном решении системы уравнений газодинамики потоков в частных производных, а именно уравнений: сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии, состояния. Многократная проверка адекватности численных моделей подтвердила, что CFD обеспечивает реалистичные прогнозы полей скорости и температуры газовой среды при пожаре вдали от источника огня, но дает существенные ошибки вблизи пламени⁶.

Известным недостатком моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики является низкая скорость расчета и требовательность к вычислительным ресурсам, многократно возрастающая при увеличении объема изучаемого пространства и степени детализации процессов. Существуют исследования, в которых указывается возможность применения для расчета параметров пожара в тоннелях более простых в математическом отношении аналитических и одномерных моделей [2, 8, 11, 12, 14, 16, 18, 20], а также гибридных моделей, основанных на комбинации нескольких методов [15, 22]. Авторы соответствующих публикаций делают акцент на возможности увеличения за счет их использования скорости расчета относительно методов CFD при сохранении приемлемой точности с точки зрения решаемых задач. При этом отмечается более узкая область применимости подобных моделей по сравнению с CFD.

Помимо возможности высокой степени детализации процессов в различных областях пространства, программные средства, реализующие CFD, позволяют создавать модели со сложной трехмерной геометрией. В работах [2–7, 9, 10, 14, 16, 17, 20–22] пространство исследуемого тоннеля имеет прямоугольное сечение, что, возможно, оправдано в случае оценки параметров газовой среды преимущественно на высоте рабочей зоны для анализа воздействия опасных факторов пожара на эвакуирующихся людей. Такой подход позволяет загустить расчетную сетку, тем самым увеличив скорость расчета. Однако в случае необхо-

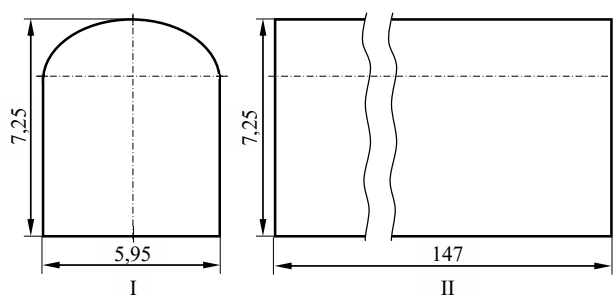


Рис. 1. Ориентировочные проектные размеры, м, горизонтальных выработок ПИЛ¹: I — поперечное сечение; II — продольное сечение

Fig. 1. Approximate design dimensions of horizontal workings, m, of an underground research laboratory¹: I — cross section; II — longitudinal section

⁴ Standard for Smoke and Heat Venting : NFPA 204 // National Fire Protection Association : URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/2/0/4/nfpa-204> (дата обращения: 01.03.2024).

⁵ Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG) // U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2012. No. NUREG-1934 (EPRI 1019195).

⁶ Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide, Volume 3: Validation // NIST Special Publication 1018-3, 2023.

димости построения температурных полей для определения теплового воздействия на ограждающие поверхности надо детально учитывать пристеночные турбулентные течения в газовой среде, которые влияют на теплообмен [15]. Следовательно, модель должна иметь более сложную геометрию, чем прямоугольный параллелепипед, а именно воспроизводить сводчатую форму верхней части горной выработки (рис. 1), аналогично тому, как это выполнено для тоннельного сооружения в [8, 12, 13, 15, 23]. При этом количество ячеек расчетной сетки возрастает.

В [5] описан опыт моделирования пожара в автотранспортном тоннеле, на основании которого авторы делают вывод о существенном влиянии на температуру газовой среды тепловых потерь, связанных с поглощением ограждающими конструкциями. При этом математическое моделирование теплопереноса выполнялось с учетом теплофизических параметров бетона.

Следует отметить, что в большинстве опубликованных работ рассматриваются сооружения, расположенные вблизи поверхности (автотранспортные [3–5, 7, 9, 14, 15, 17, 18, 20], железнодорожные [6, 10, 14] тоннели) или на глубине нескольких десятков метров (тоннели метрополитена [2, 8, 11, 12, 14]), что позволяет при формировании исходных данных для расчета использовать нормальное атмосферное давление. Уникальностью комплекса сооружений ПИЛ является заглубление на сотни метров относительно поверхности, что предположительно может оказать влияние на распределение давлений в пространстве горизонтальных выработок и вертикальных стволов, стратификацию плотности среды, особенности газообмена и динамику горения.

Таким образом, представляет интерес исследование температурного режима пожара в ПИЛ при вариации следующих настроек модели: расстояние моделируемого пространства до внешней среды, размер ячеек расчетной сетки модели, теплофизические характеристики поверхности твердых объектов, составляющих ограждение ПИЛ, способ задания вентиляционных отверстий.

Материалы и методы

Для моделирования пожара в ПИЛ использована программная платформа Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующая CFD-модель тепломассопереноса при горении. FDS выполняет численное решение уравнений Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, дополненных LES моделью турбулентности⁷. Данный программный продукт многократно верифицирован различ-

ными группами исследователей⁸. Также существуют примеры валидации результатов расчета в FDS параметров пожара в тоннелях [13, 17, 21, 23], которые показывают их высокую сходимость с данными натурных экспериментов. Таким образом, за исключением областей, находящихся в непосредственной близости к пламени, в рамках решаемой задачи FDS позволяет получить приемлемую точность прогноза температур газовой среды при пожаре в ПИЛ.

Создание трехмерной модели, ввод исходных данных и визуализация результатов моделирования выполнялись на базе программного комплекса Pyrosim⁹, который является оболочкой, реализующей графический интерфейс ядра FDS.

Пространство базовой полномасштабной модели горизонтальной выработки ПИЛ образовано комбинацией шести ортогональных расчетных сеток (рис. 2, а), которые имеют меньшие размеры ячеек вблизи зоны горения, а также в верхней части модели (для более точной имитации формы свода). Количество ячеек в сетках, согласно рекомендациям разработчиков программной платформы FDS, по каждой координатной оси выбрано кратным $2^l 3^m 5^n$, где l , m и n — целые числа⁹. Общее количество ячеек сетки — 1 422 720. Нижняя координата свободного пространства — 525 м.

Поскольку одним из вопросов исследования, которому посвящена настоящая статья, являлось изучение чувствительности результатов моделирования к размерам ячеек сетки (см. ниже), координаты элементов при построении модели выбраны кратными 0,6 м. В этом случае геометрия модели для расчета в FDS, а также расположение измерительных элементов не искажаются для размеров ячеек сетки 0,2; 0,3 и 0,6 м (делители числа 0,6). При этом модельные размеры выработки ПИЛ (длина, ширина, высота) отличаются от реальных не более чем на 0,84 %.

Ограждающие конструкции имеют толщину около 0,6 м и теплофизические параметры, которые получены экспериментально при исследовании горных пород Енисейского участка [1] (табл. 1).

В модели применена упрощенная схема естественной вентиляции, которая реализована элементами системы HVAC, включающей вентиляционное отверстие (табл. 1), расположенное в торцевой части выработки, а также соответствующую пару внутренних и внешних узлов, воздуховод. Необходимая связь внутреннего пространства модели с окружающей средой осуществляется через перечисленные элементы системы HVAC.

⁸ Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 2: Verification // NIST Special Publication 1018-2, 2023.

⁹ Pyrosim2023.3. Руководство пользователя // FireCat—pyrosim.ru: URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

⁷ Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model // NIST Special Publication 1018-1, 2023.

Таблица 1. Параметры моделирования
Table 1. Simulation parameters

Параметр Parameter	Базовая модель Basic model	Модифицированная модель Modified model	
Размер ячеек сетки a по осям X, Y, Z , м (в центральной части; в верхней части; в нижней части) Grid cell size a along the X, Y, Z axes, m (in the central part; at the top; in the lower part)	$0,1 \times 0,1 \times 0,1$; $0,1 \times 0,3 \times 0,1$; $0,3 \times 0,3 \times 0,3$	$0,1 \times 0,1 \times 0,1$; $0,1 \times 0,2 \times 0,1$; $0,2 \times 0,2 \times 0,2$	$0,1 \times 0,1 \times 0,1$; $0,1 \times 0,6 \times 0,1$; $0,6 \times 0,6 \times 0,6$
Нижняя координата свободного пространства Z , м Lower free space coordinate Z , m	-525	-450	0
Теплофизические характеристики поверхности твердых объектов Thermophysical characteristics of the surface of solid objects	$c_w = 732$ Дж/кг·К; $\lambda_w = 2,7$ Вт/м·К; $\rho_w = 2585$ кг/м ³ $c_w = 732$ J/kg·K; $\lambda_w = 2,7$ W/m·K; $\rho_w = 2,585$ kg/m ³	ADIABATIC	$c_w = 750$ Дж/кг·К; $\lambda_w = 2,99$ Вт/м·К; $\rho_w = 2715$ кг/м ³ $c_w = 750$ J/kg·K; $\lambda_w = 2,99$ W/m·K; $\rho_w = 2,715$ kg/m ³
Вентиляция Ventilation	1 отверстие Ø6 м 1 hole Ø6 m	2 отверстия Ø6 м 2 hole Ø6 m	1 отверстие Ø0,6 м 1 hole Ø0.6 m
Площадь горючей нагрузки S_r , м ² Combustible load area S_r , m ²	8,64	17,28	4,32

С позиции ужесточения условий расчета для имитации наихудшего температурного воздействия на ограждения [5] принят ряд допущений. Во-первых, горючая нагрузка представлена индустриальным маслом со следующими показателями, определяющими скорость тепловыделения: низшая теплота сгорания $Q_n = 42,7$ МДж/кг; удельная скорость выгорания $\psi_{уд} = 0,043$ кг/(м²·с) [25]; коэффициент полноты горения $\eta = 0,8$ (среднее значение для жидких углеводородов [26]). Выбор

данного вещества обусловлен высокими значениями Q_n и $\psi_{уд}$ относительно других видов горючей нагрузки, присутствующей на объекте. Во-вторых, предполагается, что в момент начала моделирования горение возникает над всей поверхностью разлива жидкости, что возможно, если начальная температура индустриального масла существенно превышает нижний температурный предел его воспламенения [19]. В-третьих, считается, что толщина слоя жидкости такова, что за время моделирования

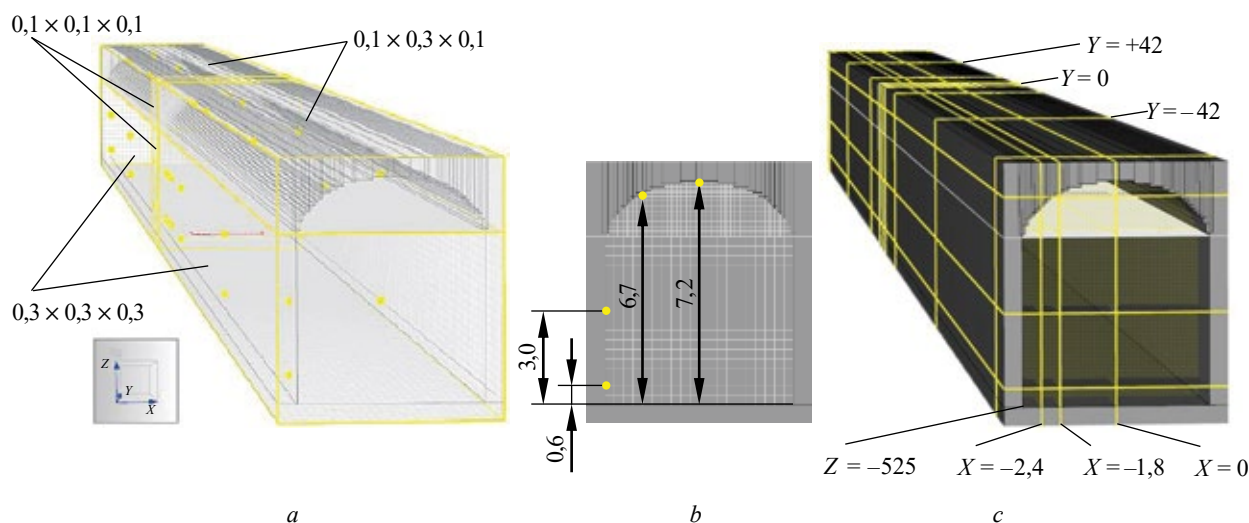


Рис. 2. Модель горизонтальной выработки ПИЛ: a — размеры ячеек сетки и измерительные датчики; b — расположение измерительных датчиков, м; c — расположение измерительных плоскостей, м
Fig. 2. Model of horizontal excavation of an underground research laboratory: a — grid cell sizes and measuring sensors; b — location of measuring sensors, m; c — location of measuring planes, m

не наблюдается выгорание вещества на отдельных участках очага пожара. Таким образом, горение происходит с одинаковой скоростью тепловыделения в течение всего расчета.

Поверхность горения площадью S_f (табл. 1) расположена в центре основания горной выработки, который совпадает с началом координат по осям X и Y .

Параметры окружающей среды и прочие настройки модели приняты задаваемыми по умолчанию в программе PyroSim, в том числе: температура $T = 20^\circ\text{C}$, плотность $\rho = 1,2041 \text{ кг/м}^3$ и теплоемкость $C_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ воздуха.

В модель добавлены следующие типы измерительных элементов, схема размещения которых в продольных и поперечных сечениях ПИЛ указана на рис. 2:

1) устройства измерения локальных значений температуры газовой среды, теплового потока, парциальной плотности и объемной концентрации кислорода (рис. 2, *a, b*);

2) плоскости для построения полей температуры газовой среды и парциальной плотности кислорода (рис. 2, *c*);

3) устройства измерения локальных значений скорости движения газовой среды, давления, плотности, а также скорости и массового расхода газа в воздуховоде.

Координаты датчиков для измерения локальных параметров газовой среды по осям X , Y , Z совпадают с соответствующими плоскостями. Вдоль оси Y измерительные элементы расположены на расстояниях $0, \pm 3, \pm 12, \pm 42, \pm 72 \text{ м}$ от геометрического центра свободного пространства. Поскольку модель во всех вариациях является симметричной относительно координатной плоскости ZOY (рис. 1), с целью сокращения расчетного времени и объема сохраняемых данных для измерений применя-

лись датчики и плоскости, расположенные только в одной половине модели.

Для проведения однофакторного эксперимента по исследованию влияния отдельных параметров модели на температурный режим пожара в базовую модель вносились изменения, систематизированные в табл. 1.

Результаты и их обсуждение

В программе FDS на базе описанной модели и ее модификаций было проведено более 30 численных экспериментов с различными комбинациями входных данных. Далее представлены результаты опытов, которые соответствуют параметрам модели, перечисленным в табл. 1, и выбраны как наиболее репрезентативные.

При моделировании свободного развития пожара в ПИЛ с использованием базовой модели установлено, что наибольшая температура достигается в припотолочном слое газа непосредственно над очагом пожара. В этой области пиковые значения температуры превышают 600°C , среднее значение температуры на развитой стадии пожара (ориентировочно после 150-й с модельного времени) составляет 305°C (рис. 3, *a*).

Измерительные элементы, расположенные на высоте $3,0 \text{ м}$ (за исключением пламенной зоны), фиксируют существенно меньшие значения температуры — до 206°C в квазистационарном режиме пожара. Датчики, расположенные на высоте $0,6 \text{ м}$, находятся за пределами слоя нагретого газа.

Температуры в точках, равноудаленных по оси Y от центра очага пожара, в верхней части пространства близки, а в нижней части существенно отличаются и имеют более высокие значения в области, удаленной от вентиляции (рис. 4). При этом в окрестности воздуховода присутствуют выраженные колебания

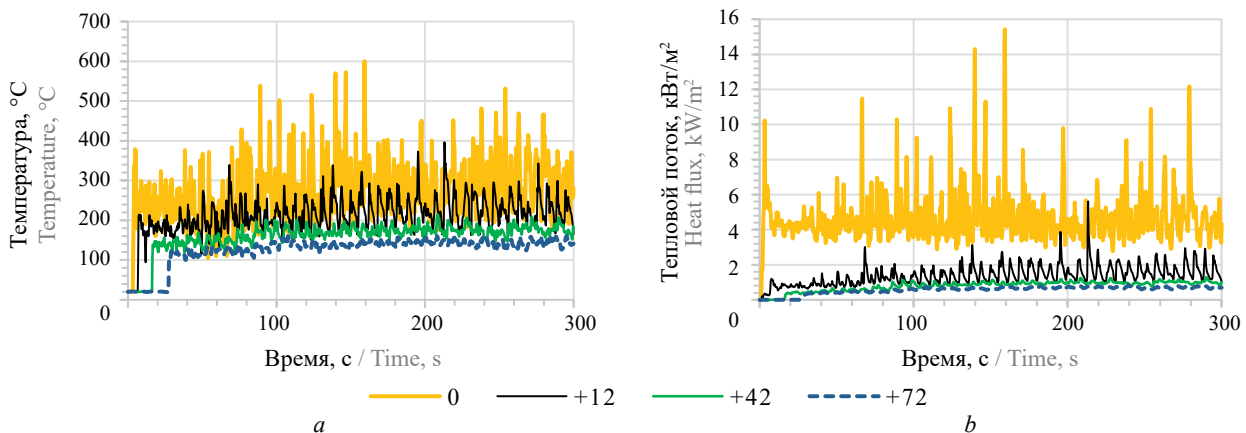


Рис. 3. Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока вблизи ограждений на высоте $6,7 \text{ м}$ в плоскостях $Y = 0 \text{ м}$, $Y = +12 \text{ м}$, $Y = +42 \text{ м}$, $Y = +72 \text{ м}$

Fig. 3. Time graphs of the gaseous medium temperature and heat flux density near the enclosures at a height of 6.7 m in planes $Y = 0 \text{ m}$, $Y = +12 \text{ m}$, $Y = +42 \text{ m}$, $Y = +72 \text{ m}$

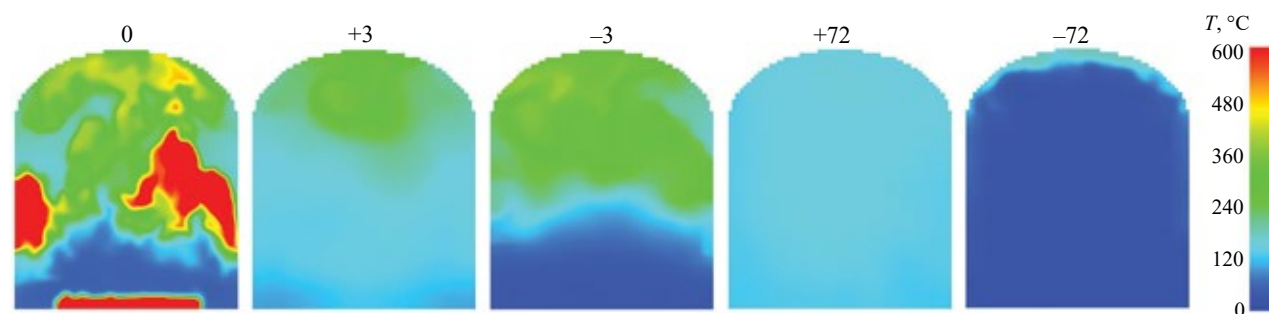


Рис. 4. Поля температуры газовой среды в момент времени 300 с в плоскостях $Y = 0$ м, $Y = \pm 3$ м, $Y = \pm 72$ м
Fig. 4. Temperature fields of the gaseous medium at time 300 s in planes $Y = 0$ m, $Y = \pm 3$ m, $Y = \pm 72$ m

температуры, связанные с возникновением направленных газовых потоков через систему вентиляции.

Рост объема зоны высоких температур в верхней части рассматриваемого пространства наблюдается до 150-й с модельного времени, после которого общий вид графиков и полей температуры практически не меняется.

Динамика теплового потока вблизи поверхности ограждений качественно согласуется с колебаниями температуры газа. Максимальная плотность теплового потока у свода ПИЛ составляет более 15 кВт/м^2 , средняя — $4,9 \text{ кВт/м}^2$ (рис. 3, б).

Объемная доля кислорода вблизи пламени не достигает на длительное время величин, при которых снижается интенсивность горения. Локальные колебания до значения $0,15$ моль/моль и ниже, при котором, согласно алгоритмам FDS, происходит подавление горения⁸, не оказывают заметного влияния на мощность пожара Q (рис. 5).

Глубина заложения комплекса подземных сооружений относительно поверхности обуславливает перепад давления P и плотности воздуха $\rho = \rho(T, P)$ с внешней средой ($\Delta P = 6303 \text{ Па}$, $\Delta \rho = 0,055 \text{ кг/м}^3$). Это приводит к образованию газообмена между ПИЛ и атмосферой с начала моделирования, когда изменения температуры еще слабо выражены (рис. 6).

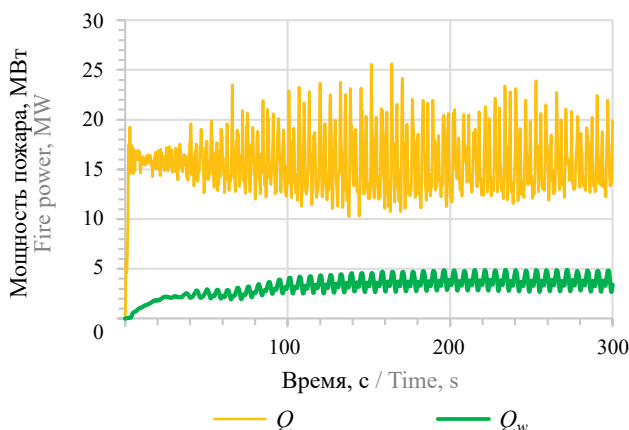


Рис. 5. Временные графики мощности пожара (Q) и количества теплоты, поглощенного ограждениями (Q_w)
Fig. 5. Time graphs of fire power (Q) and the amount of heat absorbed by the enclosures (Q_w)

Анализ влияния на температурный режим вариации отдельных характеристик модели и параметров моделирования, приведенных в табл. 1, выявил следующие особенности.

1. Уменьшение относительно базовой модели максимального размера $a_{\max}$ ячеек расчетной сетки по оси Y в верхней части пространства ПИЛ и по осям X, Y, Z — в нижней части до $a_{\max} = 0,2$ м не оказывает существенного влияния на измеряемые параметры (рис. 7, а).

Увеличение $a_{\max}$ до $0,6$ м приводит к значительным отклонениям характеристик в диапазоне времени 75–250 с. После 250-й с временные графики температуры приближаются к полученным на основе базовой модели (рис. 7, а).

В связи с наличием выраженных колебаний температуры для определения среднеквадратических отклонений экспериментальных данных при вариации $a_{\max}$ относительно базовой модели выполнено их линейное сглаживание по 41-й точке, а также синхронизация по оси абсцисс с использованием линейной интерполяции (рис. 7, б).

Наибольшее абсолютное среднеквадратическое отклонение (метрика $RMSE$) за исключением области пламени отмечается для датчика, расположенного на высоте $7,2$ м над зоной горения (табл. 2).

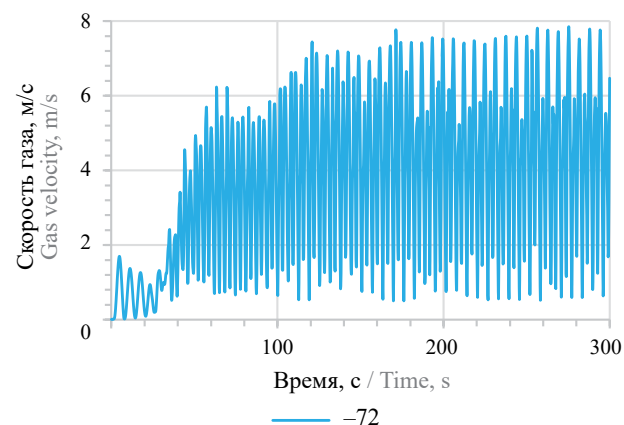


Рис. 6. Временной график нормальной составляющей скорости газа в плоскости $Y = -72$ м
Fig. 6. Time graph of the normal component of gas velocity in the $Y = -72$ m plane

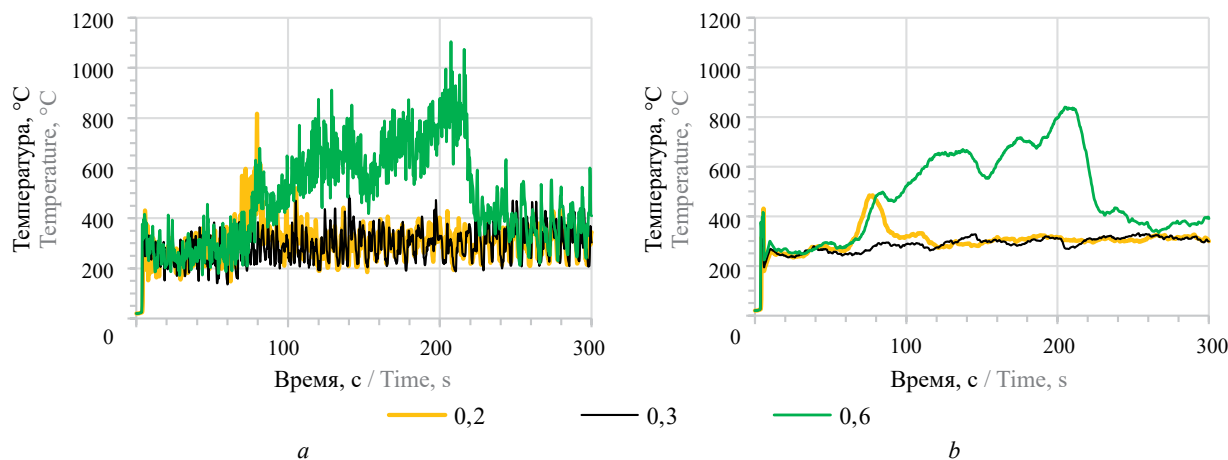


Рис. 7. Временные графики температуры газовой среды на высоте 7,2 м в плоскости $Y = 0$ м в экспериментах с $a_{\max} = 0,2$ м, $a_{\max} = 0,3$ м, $a_{\max} = 0,6$ м: a — исходные; b — сглаженные
Fig. 7. Time graphs of the gaseous medium temperature at a height of 7.2 m in the $Y = 0$ m plane in experiments with $a_{\max} = 0.2$ m, $a_{\max} = 0.3$ m, $a_{\max} = 0.6$ m: a — initial; b — smoothed

В табл. 2 также представлено изменение расчетного времени в зависимости от размеров ячеек при следующих аппаратных характеристиках компьютера: процессор $4 \times 3,40$ ГГц, оперативная память 16 Гб. Также в ходе экспериментов установлено, что излишнее уточнение сетки до размеров $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м во всей расчетной области с целью повышения детализации процессов приводит к непомерной длительности моделирования при имеющихся аппаратных средствах.

В качестве критерия выбора размера ячеек расчетных сеток (табл. 1, 2) использовано отношение D^*/a характеристического диаметра пожара к размеру ячейки, которое для получения оптимальных точности и скорости моделирования должно принимать значение⁶ в интервале от 4 до 16. При этом характеристический диаметр пожара вычисляется по формуле:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot T \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}},$$

где Q — мощность пожара, Вт;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 C_p — теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);
 T — температура воздуха, К;
 g — ускорение свободного падения, м/с².

С учетом указанных выше характеристик горючей нагрузки в базовой модели, определяющих мощность пожара ($Q = \eta Q_n \psi_{уд} S_r$ [25]), а также начальных свойств воздуха, применяемых при расчете, возможные значения размера ячеек сетки a лежат в интервале 0,17–0,66 м. Выбранные размеры ячеек сетки 0,1, 0,2, 0,3 и 0,6 м близки к найденному интервалу. Следует отметить, что на данный вывод не влияет вариация плотности воздуха в ПИЛ, имеющей

Таблица 2. Время расчета и абсолютные среднеквадратические ошибки расчета температуры относительно базовой модели при вариации максимального размера ячеек расчетной сетки $a_{\max}$

Table 2. Calculation time and absolute root-mean-square errors of temperature calculation relative to the base model with variations in the maximum cell size of the computational grid $a_{\max}$

$a_{\max}$, м $a_{\max}$, m	Число ячеек, ед. Number of cells, un.	Время расчета, ч Calculation time, h	RMSE на высоте 7,2 м, °C RMSE on high 7.2 m, °C								
			Плоскость расположения датчиков Y, м Sensor location plane Y, m								
			0	−3	−12	−42	−72	+3	+12	+42	+72
0,2	2 384 640	90,95	47	40	28	10	10	35	23	12	11
0,3	1 422 720	53,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,6	806 400	41,72	255	182	90	39	44	183	100	50	35

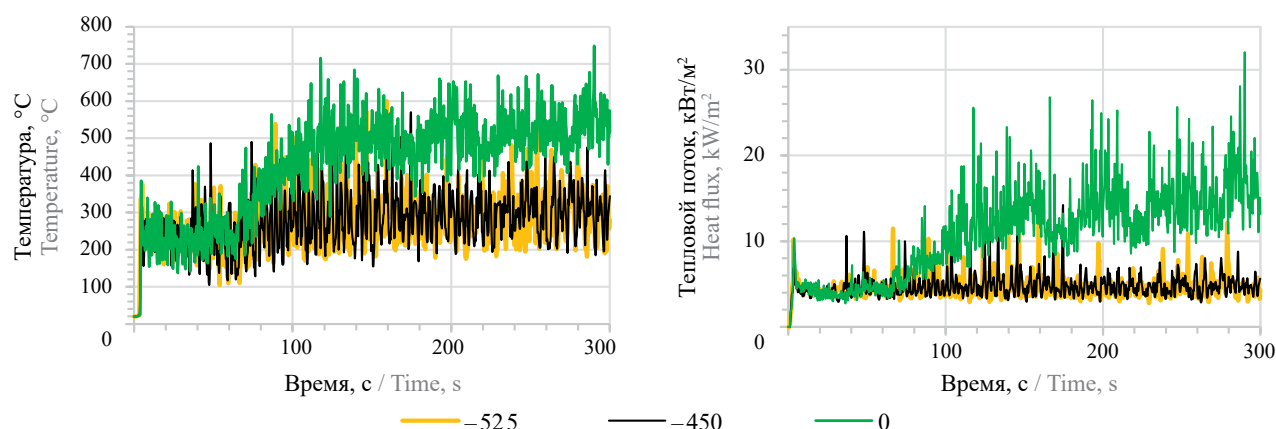


Рис. 8. Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока на высоте 6,7 м в плоскости $Y = 0$ м при $Z = -525$ м, $Z = -450$ м, $Z = 0$ м

Fig. 8. Time graphs of the gas medium temperature and heat flux at a height of 6.7 m in the $Y = 0$ m plane at $Z = -525$ m, $Z = -450$ m, $Z = 0$ m

большее значение относительно внешней среды из-за глубины подземного комплекса.

2. При учете в модели заглубления горной выработки относительно поверхности наблюдается различная динамика газообмена ПИЛ с внешней средой, обусловленная перепадом давлений и плотностей воздуха. В сценариях с нижней координатой свободного пространства выработки $Z = -525$ м и $Z = -450$ м средние значения скорости движения и массового расхода газа в воздуховоде выше, чем для эксперимента с $Z = 0$ м, а также отличаются значительной амплитудой колебаний.

Температура газа в данных экспериментах характеризуется существенной неравномерностью как по высоте пространства, так и по его длине — относительно очага пожара. На развитой стадии пожара температуры в припотолочном слое и плотности теплового потока ниже, чем полученные при расположении исследуемого объема вблизи поверхности ($Z = 0$ м)

(рис. 8). Следует отметить, что различия температур при $Z = -525$ м и $Z = -450$ м незначительны.

3. При задании в модели поверхности ограждений типа ADIABATIC (поверхность, для которой не учитывается теплообмен с газовой средой) значения температуры и теплового потока существенно возрастают относительно базового эксперимента (рис. 9, II). Таким образом, расход энергии на нагрев ограждений оказывает значительное влияние на температурный режим пожара в ПИЛ. Согласно графику (рис. 5), количество теплоты, поглощаемое ограждениями в единицу времени, составляет до 36 % от скорости тепловыделения.

Задание тепловых свойств горной породы по нижней и верхней границам экспериментальных данных (табл. 1) не приводит к заметному изменению характеристик газовой среды (рис. 9, I, III). В квазистационарном режиме пожара абсолютное отклонение средних значений температуры составляет 11 °C (отно-

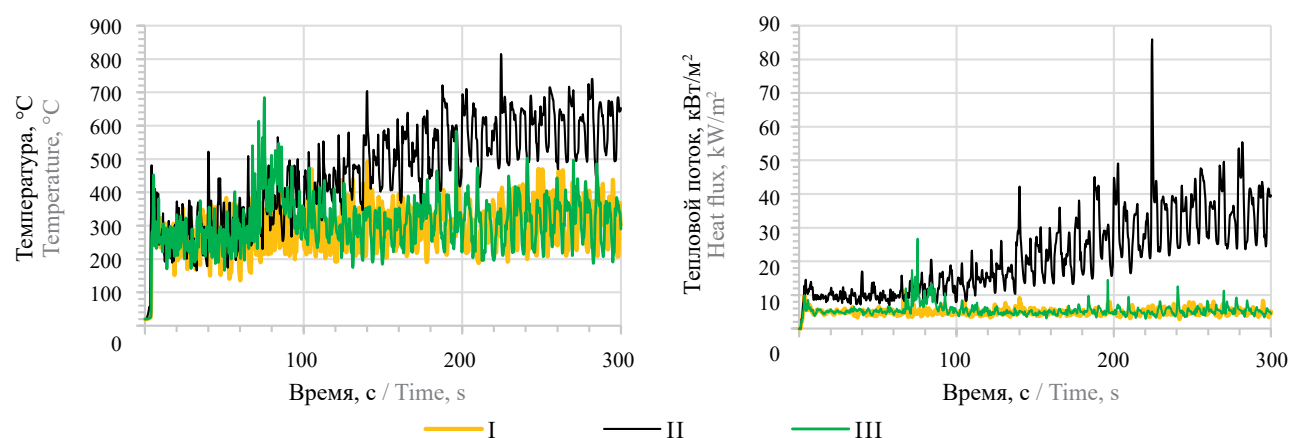


Рис. 9. Временные графики температуры газовой среды и плотности теплового потока на высоте 7,2 м в плоскости $Y = 0$ м: I — базовая модель; II — твердые поверхности ADIABATIC; III — твердые поверхности с нижней границей тепловых свойств горной породы

Fig. 9. Time graphs of the gas medium temperature and heat flux at a height of 7.2 m in the $Y = 0$ m: I — basic model; II — ADIABATIC solid surfaces; III — solid surfaces with the lower limit of the thermal properties of the rock

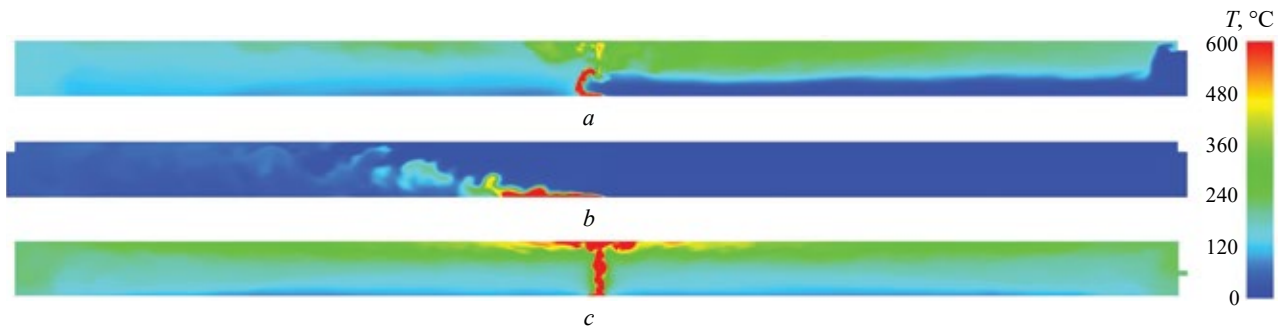


Рис. 10. Поля температуры газовой среды в плоскости $X = 0$ м в момент времени 300 с: *a* — базовая модель; *b* — модель с 2-мя вентиляционными отверстиями; *c* — модель с 1 вентиляционным отверстием минимального размера

Fig. 10. Temperature fields of the gaseous medium in the $X = 0$ m plane at time 300 s: *a* — basic model; *b* — model with 2 ventilation holes; *c* — model with 1 minimum size ventilation hole

сительное отклонение — 4 %), теплового потока — $0,32 \text{ кВт/м}^2$ (относительное отклонение — 6 %).

4. Особенности вентиляции обуславливают значительные изменения как температурного режима пожара, так и газообмена внутреннего пространства ПИЛ с внешней средой (рис. 10).

В эксперименте с двумя вентиляционными отверстиями, а также соответствующими парами воздухопроводов, внутренних и внешних узлов системы HVAC, расположенных в торцевых частях модели, образуется тяга в ПИЛ в положительном направлении вдоль оси Y (рис. 10, *b*), которая характеризуется высокими, относительно базовой модели, величинами скорости движения и массового расхода газа в воздуховодах и поперечном сечении горной выработки. Данное явление приводит к сносу пламени, а также удалению нагретых продуктов горения из пространства ПИЛ во внешнюю среду с такой интенсивностью, что не происходит их скопления в припотолочном объеме и, соответственно, нагрева ограждений. Температура газовой среды в верхней части пространства при развитом пожаре не превышает 25°C .

В другой модификации модели задается одно вентиляционное отверстие наименьшей площади (табл. 1), при которой не возникает ошибка моделирования, связанная с неустойчивостью численного решения. В этом эксперименте за время моделирования не наблюдается перехода пожара в квазистационарный режим, из-за малого газообмена с внешней средой происходит накопление тепла в пространстве ПИЛ. Во всех точках измерения фиксируются в среднем более высокие температуры газовой среды (рис. 10, *c*) и плотности теплового потока по сравнению с базовой моделью, которые растут в течение всего времени моделирования. Поля температуры характеризуются симметрией относительно плоскости ZOX . Следует отметить, что снижения концентрации кислорода в зоне горения менее 15 %, способного привести к уменьшению скорости окислительной реакции и затуханию пламени, в усло-

виях экспериментов не наблюдается даже при ограниченной вентиляции.

5. Увеличение или уменьшение площади горения в указанных пределах (табл. 1) приводит к существенному изменению температуры по всей длине припотолочной зоны ПИЛ. Наибольшие отклонения от результатов базового эксперимента фиксируются при $S_r = 17,28 \text{ м}^2$ датчиками, расположенными над зоной горения, и составляют для средних значений температур на высоте 6,7 м в квазистационарном режиме пожара: 256°C (в плоскости $Y = 0$ м), 241°C (в плоскости $Y = -3$ м), 261°C (в плоскости $Y = +3$ м). Соответствующие отклонения при $S_r = 4,32 \text{ м}^2$: 104°C (в плоскости $Y = 0$ м), 125°C (в плоскости $Y = -3$ м), 100°C (в плоскости $Y = +3$ м).

Выводы

Результаты, полученные в ходе компьютерных экспериментов, в целом согласуются с данными других исследований в области моделирования пожаров в тоннельных сооружениях с использованием CFD [3–7, 9, 10, 13–17, 21–23]. В частности:

- увеличение размеров ячеек расчетной сетки не оказывает весомого влияния на точность определения характеристик температурного режима пожара на развитой его стадии при условии соблюдения требований к максимальному размеру ячейки, при этом значительно сокращается время расчета [4, 13, 15, 21]. Поскольку результаты базового эксперимента близки к полученным при более точной сетке, то сетка с размерами ячеек $a_{\max} = 0,3$ м может считаться адекватной относительно целей исследования. Следствием увеличения $a_{\max}$ до 0,6 м является значительное отклонение характеристик в интервале времени 75–250 с. Учитывая рекомендации разработчика FDS избегать использования сеток, линейные размеры ячеек которых отличаются более чем в 3 раза, а также тот факт, что при $a_{\max} = 0,6$ м не наблюдается существенного прироста произ-

водительности вычислений (табл. 2), в рамках исследования следует считать нецелесообразным применение подобной модификации модели;

- схема вентиляции оказывает значительное влияние на динамику пожара [7, 13, 17, 21, 23]. Сокращение или отсутствие отвода продуктов горения в атмосферу обуславливает наихудшие условия с точки зрения температурного воздействия на ограждения. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что особенности вентиляции и газообмена с внешней средой являются одним из основных факторов, которые необходимо учитывать при создании модели с целью получения достоверного прогноза температур газовой среды при пожаре в ПИЛ;
- при моделировании необходимо учитывать теплоотвод ограждениями, который существенно влияет на температуру газовой среды [5, 9, 10]. Несмотря на то что в случае вариации теплофизических параметров горной породы в экспериментально определенных пределах [1] исследуемые характеристики соизмеримы, с точки зрения необходимости анализа последствий пожара при наихудших условиях целесообразно при настройке модели указывать нижние границы теплоемкости, теплопроводности и плотности твердых поверхностей, при которых энергия, поглощаемая горной породой, будет минимальна, и, следовательно, температура газовой среды — максимальна.

Следует отметить ряд особенностей, которые были установлены в результате анализа пожара на исследуемом объекте при заданных условиях эксперимента:

- координаты пространства относительно поверхности оказывают влияние на газообмен ПИЛ с внешней средой, а также значения и объемное распределение температур газовой среды;

- полученные зависимости температур отличаются от стандартного температурного режима, создаваемого при испытаниях строительных конструкций на огнестойкость¹⁰;
- наиболее интенсивное тепловое воздействие на ограждения наблюдается в припотолочном слое газа непосредственно над зоной горения при ограниченной вентиляции;
- снижения концентрации кислорода в зоне горения до величины, оказывающей влияние на мощность пожара, не возникает.

Таким образом, поскольку подземный комплекс, включающий ПИЛ, является уникальным сооружением, компьютерные модели, позволяющие прогнозировать развитие пожара в тоннеле, должны быть адаптированы с учетом характеристик объекта.

Разработанная компьютерная модель ПИЛ, принимая во внимание выявленные особенности, может быть использована для проверки на основе численных экспериментов эффективности систем противопожарной защиты на объекте, анализа динамики пожара при различных условиях вентиляции, а также моделирования прогрева ограждений как при свободном развитии пожара, так и при воздействии на них огнетушащих веществ.

Данные, которые получены в результате исследования пожара в ПИЛ, позволяют обоснованно задать диапазоны изменения температурных показателей среды при проведении огневых испытаний образцов горных пород, составляющих ограждения сооружений подземного комплекса.

¹⁰ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования // КонсультантПлюс : сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_287370/fb6746a7db73abb486f778631939798e0f344d33/# (дата обращения: 01.03.2024).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Озерский Д.А., Орлова А.И. Анализ прочностных характеристик горной породы для обоснования безопасности строительства подземных сооружений ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 70–76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76
2. Агеев П.М., Шарапов С.В., Голиков А.Д. Расчет основных параметров пожара подвижного состава в тоннеле метрополитена // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2011. № 4. С. 67–75.
3. Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С. Применение численного моделирования для оценки влияния продольного уклона в автотранспортном тоннеле на распространение опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2021. № 4 (105). С. 31–39. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.95.98.003
4. Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С. Численное моделирование пожара в автодорожном тоннеле. Выбор расчетной сетки // Пожарная безопасность. 2021. № 3 (104). С. 47–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.72.64.005
5. Ворогушин О.О., Корольченко А.Я., Ляпин А.В. Расчет температурного режима пожара при определении пределов огнестойкости строительных конструкций в зданиях, расположенных над транспортными магистралями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 4. С. 33–37.
6. Данилов А.И., Сиваков И.А., Пилипенко Н.В., Петров А.В., Костерева П.А. Моделирование пожара пассажирского поезда в железнодорожном тоннеле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 340–347. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

7. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. Развитие экспериментальных исследований пожарной опасности автотранспортных тоннелей // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 87–92.
8. Лугин И.В., Алферова Е.Л. Тепломассообменные процессы при горении поезда в однопутном тоннеле метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 324–332.
9. Мельничук С.Ф., Голиков А.Д. Компьютерное моделирование пожара в тоннеле : мат. Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Ч. IV. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С. 116–117.
10. Таранцев А.А., Кондратьев С.А., Рузманов М.Д., Химчук Д.В. Программное моделирование для решения задач по обеспечению пожарной безопасности в тоннелях // Военный инженер. 2022. № 1 (23). С. 57–63.
11. Романченко С.Б., Чистяков А.В., Буторин С.Н. Компьютерное моделирование аварийных вентиляционных режимов транспортных тоннелей и метрополитенов // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 158–166.
12. Садыгов А.Б. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 2. С. 118–125.
13. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J.P. et al. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 47. Pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.09.009
14. Chow W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model // Tunnelling and Underground Space Technology. 1996. Vol. 11. No. 2. Pp. 221–236.
15. Colella F., Rein G., Verda V., Borchellini R. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels // Computers & Fluids. 2011. Vol. 51. No. 1. Pp. 16–29. DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.06.021
16. Jain S., Kumar Sh., Kumar S., Sharma T.P. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. Vol. 23. No. 2. Pp. 160–170. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.004
17. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N. et al. Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel // Georgian Scientists. 2020. Vol. 2. No. 4. DOI: 10.52340/g.s.02.09.235
18. Li H., Zhu W., Tang M., Shi C., Tang F. Burning characteristic and ceiling temperature of moving fires in a tunnel: A comparative study // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 145. P. 105571. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105571
19. Pozharkova I.N. Features of modeling the combustion processes of flammable liquids with high ignition temperature in FDS software // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1679. No. 2. P. 022048. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022048
20. Takeuchi S., Aoki T., Tanaka F., Moinuddin K.A. Modeling for predicting the temperature distribution of smoke during a fire in an underground road tunnel with vertical shafts // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. Pp. 312–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.063
21. Fernandez-Alaiz F., Castanon A.M., Gomez-Fernandez F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-scale tests and CFD modeling // Applied sciences. 2020. Vol. 10. No. 10. P. 3380. DOI: 10.3390/app10103380
22. Verda V., Borchellini R., Cosentino S., Guelpa E., Tuni J.M. Expanding the FDS simulation capabilities to fire tunnel scenarios through a novel multi-scale model // Fire Technology. 2021. Vol. 57. Pp. 2491–2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y
23. Niu H.Y., Qiao C.L., An J.Y., Deng J. Experimental study and numerical simulation of spread law for fire on tunnel // Journal of Central South University. 2015. Vol. 22. No. 2. Pp. 701–706. DOI: 10.1007/s11771-015-2573-z
24. Пожаркова И.Н. Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5 (113). С. 1–15.
25. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : уч. пос. М. : Академия ГПС МВД России, 2005. 118 с.
26. Кукин П.П. и др. Теория горения и взрыва / под ред. П.П. Кукина, В.В. Юшина, С.Г. Емельянова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Юрайт, 2017. 346 с.

REFERENCES

1. Ozersky D.A., Orlova A.I. Strength characteristics of rock and their analysis in the construction safety assessment of underground URF structures. *Radioactive waste*. 2023; 1(22):70-76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76 (rus).
2. Ageev P.M., Sharapov S.V., Golikov A.D. Calculation of key parameters of the fire of the rolling stock in the underground tunnel. *Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2011; 4:67-75. (rus).
3. Bolodyan I.A., Puzach S.V., Baranovsky A.S. Application of numerical modeling to assess the influence of the longitudinal slope in a road tunnel on the fire hazards spread. *Fire Safety*. 2021; 4(105):31-39. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.95.98.003 (rus).

4. Bolodyan I.A., Puzach S.V., Baranovsky A.S. Numerical modeling of fire in a road tunnel. Selection of calculation grid. *Fire Safety*. 2021; 3(104):47-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.72.64.005 (rus).
5. Vorogushin O.O., Korolchenko A.Ya., Lyapin A.V. Calculation of a temperature mode of fire at determination of fire resistance limits of construction designs in buildings, located over transport highways. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(4):33-37. (rus).
6. Danilov A.I., Sivakov I.A., Pilipenko N.V., Petrov A.V., Kostereva P.A. Modeling a passenger train fire in a railway tunnel. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017; 17(2):340-347. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347 (rus).
7. Kopylov N.P., Khasanov R.R., Sushkina E.Yu. Development of experimental research in fire hazard of motor transport tunnels. *Fire Safety*. 2013; 4:87-92. (rus).
8. Lugin I.V., Alferova E.L. Heat and mass transfer processes during train combustion in a single-track metro tunnel. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 7:324-332 (rus).
9. Melnichuk S.F., Golikov A.D. Computer modeling of a fire in a tunnel. *Materials of the All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduate Students. Part IV*. 2008; 116-117. (rus).
10. Tarantsev A.A., Kondratyev S.A., Ruzmanov M.D., Khimchuk D.V. Software modeling for solving problems of ensuring fire safety in tunnels. *Military Engineer*. 2022; 1(23):57-63. (rus).
11. Romanchenko S.B., Chistyakov A.V., Butorin S.N. Computer simulation of emergency ventilation conditions for traffic tunnels and underground subways. *Fire Safety*. 2015; 4:158-166. (rus).
12. Sadygov A.B. Modeling the movement of air flows in underground structures of the metro during a fire. *Electronic Processing of Materials*. 2012; 48(2):118-125. (rus).
13. Blanchard E., Boulet P., Desanghere S., Cesmat E., Meyrand R., Garo J.P. et al. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel. *Fire Safety Journal*. 2012; 47:18-31. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.09.009
14. Chow W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996; 11(2):221-236.
15. Colella F., Rein G., Verda V., Borchellini R. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels. *Computers & Fluids*. 2011; 51(1):16-29. DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.06.021
16. Jain S., Kumar Sh., Kumar S., Sharma T.P. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008; 23(2):160-170. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.004
17. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Makharadze L., Kunchulia T., Arudashvili N. et al. Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel. *Georgian Scientists*. 2020; 2(4). DOI: 10.52340/g.s.02.09.235
18. Li H., Zhu W., Tang M., Shi C., Tang F. Burning characteristic and ceiling temperature of moving fires in a tunnel: A comparative study. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024; 145:105571. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105571
19. Pozharkova I.N. Features of modeling the combustion processes of flammable liquids with high ignition temperature in FDS software. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1679(2):022048. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022048
20. Takeuchi S., Aoki T., Tanaka F., Moinuddin K.A. Modeling for predicting the temperature distribution of smoke during a fire in an underground road tunnel with vertical shafts. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:312-319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.063
21. Fernandez-Alaiz Fernandez-Alaiz F., Castanon A.M., Gomez-Fernandez F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-scale tests and CFD modeling. *Applied Sciences*. 2020; 10(10):3380. DOI: 10.3390/app10103380
22. Verda V., Borchellini R., Cosentino S., Guelpa E., Tuni J.M. Expanding the FDS simulation capabilities to fire tunnel scenarios through a novel multi-scale model. *Fire Technology*. 2021; 57:2491-2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y
23. Niu H.Y., Qiao C.L., An J.Y., Deng J. Experimental study and numerical simulation of spread law for fire on tunnel. *Journal of Central South University*. 2015; 22(2):701-706. DOI: 10.1007/s11771-015-2573-z
24. Pozharkova I.N. Analysis of problems and methods for mathematical modeling of fires in tunnel structures. *Engineering Journal of Don*. 2024; 5(113):1-15. (rus).
25. Koshmarov Yu.A. Forecasting hazardous factors of indoor fire : a textbook. *State Fire Academy EMERCOM of Russia*. 2005; 118. (rus).
26. Kukin P.P. et al. *Theory of combustion and explosion* . V.V. Yushina, S.G. Emelyanova et al. (Ed.). Yurayt Publishing House, 2017; 346. (rus).

Поступила 09.04.2024, после доработки 27.05.2024;

принята к публикации 13.06.2024

Received April 9, 2024; Received in revised form May 27, 2024;

Accepted June 13, 2024

Информация об авторе

ПОЖАРКОВА Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, улица Северная, 1; доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79; РИНЦ ID: 501137; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: pozharkova@mail.ru

Information about the author

Irina N. POZHARKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Department of Technical Examinations and Criminalistics, Siberian Fire and Rescue Academy of Emercom of Russia, Severnaya St., 1, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russian Federation; Associate Professor of Department of Automation, Automated Control and Design Systems, Siberian Federal University, Svobodniy Avenue, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ID RSCI: 501137; ResearcherID: A-7628-2015; ORCID: 0000-0003-1153-350X; e-mail: pozharkova@mail.ru

Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин

Марина Викторовна Гравит ✉, Эльдар Захирович Мамедов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Российскими стандартами предусматриваются детерминированные показатели требуемой огнестойкости несущих конструкций промышленных объектов. Изменения в СП 4.13130 базируются на американском стандарте API 2218, где предполагается вероятностный подход для определения зон воздействия пожара и требуемых пределов огнестойкости. Однако данный подход не получил распространения на объектах нефтяной промышленности из-за отсутствия методики по определению зон воздействия при горении углеводородов.

Цели и задачи. Согласно обозначенным сценариям, определить фактические пределы огнестойкости стальных конструкций эстакад для получения зависимости огнестойкости конструкций от расстояния до очага пожара. Разработать полевые модели пожара согласно проектной документации; определить зоны, подверженные воздействию критической температуры; определить огнестойкости конструкций при различных режимах пожара.

Методы. Исходными данными являлась проектная документация трех месторождений при кустовом расположении скважин. В работе смоделированы наиболее опасный и вероятный сценарии пожаров пролива для каждого месторождения. Разработаны модели эстакад нефтегазовых сетей в ПК Revit. Распространение ОФП смоделировано методом полевого моделирования пожара в ПК PyroSim.

Результаты. Определены фактические пределы огнестойкости конструкций эстакад трех месторождений; определены размеры зон воздействия пожара, в которых требуется огнезащита конструкций. Огнезащита для обеспечения огнестойкости R60 требуется на расстоянии менее 10,7 м при очаге пожара 305,24 МВт; при очаге 38,6 МВт достижение критической температуры происходит до 3 м.

Выводы. При «реальном» режиме пожара конструкции могут иметь более высокие пределы огнестойкости, чем требуется в нормативных документах. Моделирование и расчет огнестойкости позволяют определить необходимость огнезащиты для каждой зоны воздействия пожара, а не только в радиусе до 12 метров. Научные исследования в данной области позволят разработать новые нормативные документы по определению зон воздействия пожара и пределов огнестойкости для конструкций вне помещений.

Ключевые слова: сооружения нефтегазового комплекса; пожарная безопасность; опасные факторы пожара; предел огнестойкости; стальные конструкции; средства огнезащиты; углеводородный режим пожара; опасные факторы пожара

Для цитирования: Гравит М.В., Мамедов Э.З. Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 36–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51

✉ Гравит Марина Викторовна, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures

Marina V. Gravit ✉, Eldar Z. Mamedov

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Russian standards provide deterministic indicators of the required fire resistance of load-bearing structures of industrial facilities. Changes in CP 4.13130 are based on the American standard API 2218, where a probabilistic approach is assumed for determining fire exposure zones and required fire resistance limits. However, this approach is not used at oil industry facilities due to the lack of a methodology for determining the impact zones for hydrocarbon combustion.

Aims and objectives. The aim of this study is to determine the actual fire resistance limits of steel overpasses executing indicated scenarios in order to obtain the dependence of fire resistance of structures on the distance to the source of fire. Objectives of the study also include developing field fire models according to the design documentation; determination of the zones exposed to critical temperature; identifying the fire resistance of structures under different fire regimes.

Methods. The initial data was the design documentation of three oil fields with cluster arrangement of wells. The most dangerous and probable oil or gas spill fire scenarios were modelled for each field. Models of raised oil and gas pipelines were developed using Revit software. Fire hazard spreading was modelled by the method of field fire simulation using PyroSim.

Results. The study found actual fire resistance limits of pipelines of three fields, along with the sizes of fire impact zones, where fire protection of structures is required. Fire protection to ensure fire resistance R60 is required at less than 10.7 m at a source of fire of 305.24 MW; at 38.6 MW the critical temperature is reached in the radius of as low as 3 m.

Conclusions. In a "real" fire regime, structures may have higher fire resistance limits than required in the regulations. Modelling and calculation of fire resistance allows to determine the need for fire protection for each zone of fire exposure, not only within a radius of up to 12 meters. Scientific research in this area will make it possible to develop new normative documents for determining the fire exposure zones and fire resistance limits of exterior structures.

Keywords: oil and gas complex; structures; fire hazards; fire resistance limit; steel structures; fire protection; hydrocarbon fire regime; fire hazards

For citation: Gravit M.V., Mamedov E.Z. Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):36-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51 (rus).

✉ Marina Viktorovna Gravit, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Введение

Современный нефтяной промысел характеризуется высоким уровнем автоматизации и телемеханизации, позволяющим осуществлять контроль и управление режимами эксплуатации нефтяных скважин, системами сбора и подготовки нефти, газокompрессорными, нефтяными и водонасосными станциями. Тем не менее статистика пожаров в России и мире показывает, что возгорания и пожары на объектах нефтегазового комплекса происходят достаточно часто¹.

Кустовой способ разбуривания месторождений характеризуется тем, что на ограниченной части месторождения оборудуется специальная площадка для размещения группы скважин, нефтегазодобывающего оборудования, служебных и бытовых помещений и т.п. Габариты кустовой площадки определяются количеством скважин и расстоянием между ними. Расстояние между отдельными объектами, возможность проезда пожарной техники, а также правила безопасности производства работ на объектах нефтегазодобывающей промышленности регламентируются № 123-ФЗ², другими нормативными документами, например СП 4.13130.2013³, и в первую очередь СП 231.1311500.2015⁴. Расстояние

между оборудованием кустовой площадки должно отвечать требованиям по пожарной и промышленной безопасности как в процессе строительства скважин и монтажа оборудования, так и при их эксплуатации, обслуживании, ремонте и демонтаже.

Различного рода оборудование, технологические аппараты, насосы располагаются на эстажках и эстакадах, как правило, образуемых сварными элементами стальных конструкций и решетчатыми настилами.

Российские нормативные документы в области пожарной безопасности предполагают детерминированный подход к определению требуемых пределов огнестойкости конструкций. Испытания и расчеты производятся при стандартном (целлюлозном) режиме пожара (рис. 1), а не при углеводородном, как это нормируется в США, Европе [1, 2]. При расчетах сценариев развития пожара в России ориентируются только на вероятность эвакуации людей и индивидуальный пожарный риск, не учитывая сохранность объекта защиты, в том числе строительных конструкций, которые обеспечивают его устойчивость при пожаре. В [3] сравнивались требования, предъявляемые к огнестойкости стальных конструкций на объектах нефтеперерабатывающих производств, согласно российским нормативным документам и американскому стандарту API RP 2218⁵. Выявлены значительные отличия в подходах к определению требуемой огнестойкости. В то время как российские нормы предполагают детерминированный подход к определению огнестойкости конструкций, амери-

¹ Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 27.03.2024).

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.

³ СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

⁴ СП 231.1311500.2015. Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности.

⁵ API Recommended Practice 2218 (API 2218). Fire proofing. Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants. 3rd ed. American Petroleum Institute, 2013. 60 p.

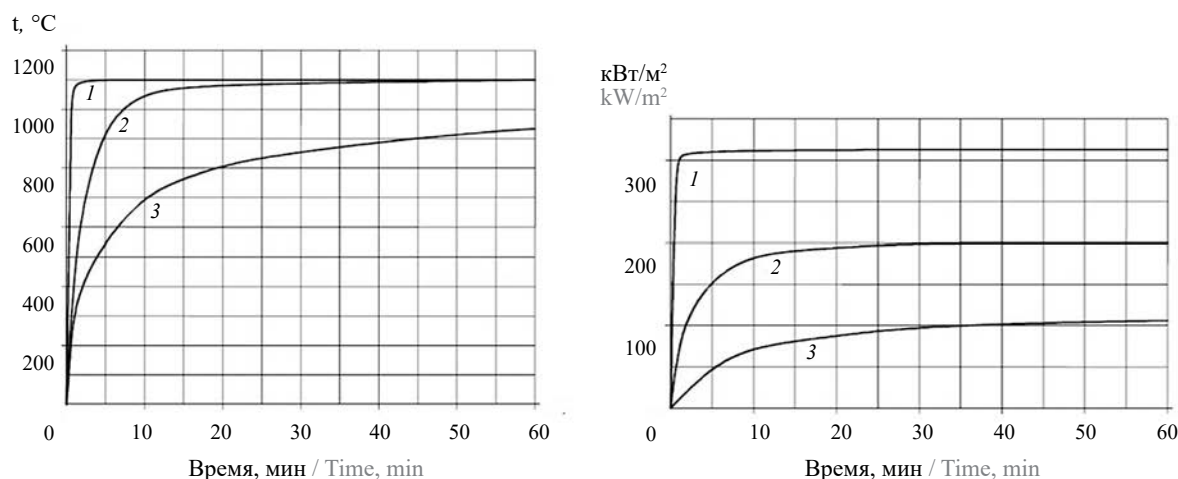


Рис. 1. Графики режимов пожара: 1 — режим Jet-Fire; 2 — углеводородный режим пожара; 3 — стандартный режим пожара
Fig. 1. Graphs of fire modes: 1 — Jet-Fire mode; 2 — hydrocarbon fire mode; 3 — standard fire mode

канский стандарт предлагает риск-ориентированный метод, заключающийся в определении вероятности необходимости применения огнезащиты в каждом месте конструкции.

Основным положением документа API 2218⁴ является определение так называемой «зоны воздействия пожара», в пределах которой необходима огнезащита строительных конструкций. Аналогичный принцип реализован в британском руководстве BSI BS PD 7974-7-2019⁶. Зона воздействия пожара представляет собой пространство, в которое могут при аварийной ситуации выйти из оборудования и трубопроводов горючие и сжиженные газы, ЛВЖ или ГЖ, горение которых может привести к существенным повреждениям строительных конструкций, технологического оборудования и трубопроводов [4]. Расположение и размеры зоны воздействия пожара устанавливаются на основе анализа риска или корпоративных стандартов.

Как уже говорилось выше, в России требования пожарной безопасности для нефтяных и газовых месторождений регламентируются положениями № 384-ФЗ⁷, № 123-ФЗ¹ и СП 231.1311500.2015³. Последний документ содержит ссылки на различные нормативные документы пожарной безопасности, а именно к СП 4.13130² и № 384-ФЗ⁶, содержащему требования к этажеркам и эстакадам. В российских нормативных документах отсутствуют требования о необходимости соответствия пределов огнестойкости углеводородным режимам пожара, таким как пожары проливов и факельные горения. Кроме этого, отсутствуют утвержденные методики испытаний огнезащитных материалов в условиях криогенного

воздействия и быстрого роста температуры (например, пожары струйного горения, Jet Fire [5]), обусловленного спецификой производств. Согласно выводам работы [6], внедрение основных положений API 2218⁴ в российские нормативные документы позволит более гибко подойти к определению требуемых пределов огнестойкости конструкций предприятий нефтегазового комплекса.

В последней редакции СП 4.13130² уже введено понятие «зона воздействия пожара», которое и заимствовано из API 2218⁴, где для жидких углеводородов горизонтальный и вертикальный размеры зоны воздействия пожара находятся в диапазоне от 6 до 12 м от возможного источника поступления горючего продукта. Наружные этажерки, на которых располагаются оборудование или трубопроводы, содержащие легковоспламеняющиеся и горючие жидкости и горючие газы, выполняются железобетонными (нижний ярус) или, как правило, стальными. В стальных этажерках первый ярус, включая перекрытие, но на высоту не менее 4 м необходимо защищать от воздействия высокой температуры. Предел огнестойкости защищенных конструкций должен быть не менее R45 (п. 6.5.47 СП 4.13130.2013²). Допускается применять незащищенные стальные конструкции этажерок при оборудовании их стационарными автоматическими установками пожаротушения. Технологические трубопроводы с горючими и сжиженными горючими газами, легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, прокладываемые на территории предприятия, должны быть наземными или надземными на опорах и эстакадах из материалов НГ. Предел огнестойкости колонн эстакад на высоту первого яруса должен быть не менее R60 (п. 6.10.4.1 СП 4.13130.2013²).

Пределы огнестойкости несущих конструкций площадок и этажерок, на которых расположены оборудо-

⁶ RD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. 26.06.2003.

⁷ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

дование и аппараты, в которых обращаются сжиженные горючие газы, легко воспламеняющиеся и горючие жидкости, нормируются не менее R 120 на высоту отметки первого яруса, но не менее 12 м. При этом предел огнестойкости перекрытия первого яруса, на котором расположены такое оборудование и аппараты, должен составлять не менее REI 120 (п. 4.5.48 СП 4.13130.2013²).

Современные ПК по моделированию распространения опасных факторов пожара, реализующие полевую модель, в комплексном расчете с ПК по теплопередаче в твердом теле, позволяют рассчитать прогрев среды (полевая модель) и конструкций (модели, реализующие метод конечных элементов), в том числе для цели определения пределов огнестойкости. Получив плотность теплового потока и температуру на стыке сред «воздух – конструкция», возможно использовать данные для расчета прогрева конструкции с учетом нагрузок и усилий, выбрав последние из информационной модели объекта. Например, в [7] рассматривают интеграцию технологий BIM проектирования и расчета воздействия пожара при помощи FDS на примере связки Revit-RugroSim. В ходе работы разработан удобный способ обмена информацией между IFC моделью и FDS файлом. В работе [8] показывают большой потенциал инструментов моделирования пожаров для оценки основных последствий среднemasштабных и крупномасштабных пожаров углеводородов. Авторы в [9] получили зависимость между приведенной толщиной конструкции и ее пределом огнестойкости для стандартного и углеводородного режима пожара. Получен переводной коэффициент для незащищенных стальных конструкций, зависящий от приведенной толщины элемента. В работе [10] получен переводной коэффициент достижения критической температуры при стандартном режиме к углеводородному режиму для стальных конструкций с различными видами огнезащиты с учетом как экспериментальных данных, так и методом численного моделирования.

В работе [11] проведен расчет требуемого предела огнестойкости конструкций технологических этажей газоперерабатывающего завода. Использован принцип вероятностного подхода для разработки методики определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов, учитывающей время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций. По итогам работы получена зависимость требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций от заданной величины надежности строительных конструкций при пожаре. Авторы работы [12] объясняют механизм возникновения каскадного пожара пролива с фазовым переходом СПГ, вызванного

утечкой из резервуара для хранения при воздействии ветра. Также рассмотрено влияние ветрового воздействия на распространение опасных факторов пожара.

В статье [13] модель пожара используется, чтобы выяснить, каким образом заданные сценарии пожаров пролива, возникающих в результате воспламенения топлива в заранее определенных резервуарах, могут распространяться на соседние резервуары. Делается вывод о необходимости конкретных рекомендаций по минимальному безопасному расстоянию для анализа эксплуатационных характеристик резервуаров для хранения, подверженных воздействию пожара.

Авторы работы [14] также рассматривают зоны влияния аварий на магистральных трубопроводах, разделяя расстояние на радиус гибели людей и радиус травмирования. В [15] получены зависимости изменения теплового потока от расстояния при пожаре резервуара сжиженного газа. В [16] авторы рассмотрели три наиболее правдоподобных сценария пожара из 27 и их моделирование с помощью программного обеспечения FDS и провели анализ эффективности различных огнезащитных материалов на основе максимального теплового потока, получаемого оборудованием. В [17] представлено сравнительное исследование по прогнозированию теплового поведения морской надводной конструкции в условиях локализованного пожара с использованием различных моделей пожара. Тепловой анализ разработан с помощью коммерческого программного обеспечения конечных элементов. Анализируются три примера локализованного пожара, вызванного горением углеводородов. Также стальные конструкции верхней части типичной морской платформы исследуются в [18], используется также ПО, реализующее МКЭ — ABAQUS. Взрывная нагрузка углеводородов прикладывается в виде избыточного давления на балки и колонны.

Цель настоящей статьи — смоделировать воздействие пожара согласно выбранным сценариям на стальные конструкции эстакад и рассчитать фактические пределы огнестойкости данных конструкций в зависимости от расстояния от очага пожара.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- проанализирована проектная документация трех нефтегазодобывающих месторождений с кустовым расположением скважин;
- из проектной документации объектов выбраны сценарии развития пожара и определены зоны воздействия пожара;
- построены полевые модели пожара с параметрами согласно проектной документации по разработке месторождений;

- определены пределы огнестойкости конструкции эстакад согласно граничным условиям в зонах, подверженных воздействию критических показателей температуры и теплового потока;
- получены зависимости предела огнестойкости конструкции от расстояния от очага пожара.

Материалы и методы

Объектами исследования являются три нефтегазодобывающих месторождения с кустовым расположением скважин, которые связаны между собой нефтегазосборными сетями на эстакадных конструкциях. Пример месторождения с кустовым расположением в виде фото приведен на рис. 2. В статье все месторождения обозначены номерами.

Методы. Расчет распространения опасных факторов, прогрева внешних плоскостей конструкции и распространения пламени проводится в ПО PyroSim. Данное ПО поддерживает импорт модели через формат IFC. Метод выбора сценариев выполнен согласно Приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404⁸. В результате анализа исходной документации выбран наиболее опасный сценарий и один из вероятных с развитием пожара факела и пролива.

Для месторождения № 1 рассмотрены 54 сценария, наиболее опасным принят сценарий с разрушением газопровода Ø 530 мм с возникновением факельного горения. Количество опасных веществ определялось с учетом нормативного времени срабатывания запорных устройств, установленных на границах технологических блоков. При этом учитывалось, что не все количество вещества, выбрасываемое или истекающее из аварийного оборудования, может участвовать в создании поражающих факторов или непосредственно наносит ущерб.

Для месторождения № 2 рассмотрены 48 сценариев, сценарий наиболее опасной аварийной ситуации — разрушение нефтегазосборного трубопровода диаметром 325 мм с возникновением вспышки облака ГПВС. Радиус зоны воздействия высокотемпературных продуктов сгорания — 100,3 м.

Для месторождения № 3 рассмотрены 42 сценария, худшим принят сценарий с наиболее вероятной аварийной ситуацией в виде пожара пролива при разгерметизации нефтегазосборного трубопровода.

Построена полевая расчетная модель, длительность моделирования — 300 с (с учетом максимального времени срабатывания запорной арматуры согласно Приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404⁷), размеры сетки $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м.

⁸ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404.



Рис. 2. Пример кустовой площадки на Харасавэйском месторождении (URL: <https://www.gazprom.ru/projects/kharasaveyskoye/>)
Fig. 2. Example of a cluster site at the Kharasaveyskoye field (URL: <https://www.gazprom.ru/projects/kharasaveyskoye/>)

Для фиксации изменения показателей температуры и величины теплового потока на расстояниях 0, 3, 6 и 12 м от очага пожара устанавливаются соответствующие датчики.

При подготовке FDS модели задаются следующие объекты: непроницаемая холодная поверхность земли, поверхность горелки с расходом горючего, соответствующего заданной удельной мощности тепловыделения, открытые границы расчетной области, точки мониторинга лучистого теплового потока, точки мониторинга температуры и вертикальной скорости.

Горючая нагрузка принималась в соответствии с проектной документацией на объекты строительства (табл. 1).

Недостающие параметры задавались исходя из базы данных типовой горючей нагрузки. В PyroSim также необходимо задать постоянную удельную скорость тепловыделения HRRPUA, определяемую по формуле:

$$\text{HRRPUA} = H_f \cdot \psi_{\text{уд}}, \quad (1)$$

где H_f — низшая рабочая теплота сгорания, кДж/кг; $\psi_{\text{уд}}$ — удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с), определяемая по библиотеке реакций и поверхностей горения PyroSim 2023. Для нефти:

$$\psi_{\text{уд}} = 0,024 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}.$$

Для расчета предела огнестойкости конструкции при моделируемом пожаре применяется программный комплекс Elcut, реализующий метод конечных элементов. Для задания граничных условий выполнена аппроксимация полученного графика зависимости температуры от времени в моделируемом пожаре в квадратный полином. При этом эквивалентная продолжительность пожара рассчитана в соответствии с [19]. Прогрев конструкции при стандартном и угле-

Таблица 1. Исходные данные для моделирования пожара
Table 1. Initial data for fire modelling

Номер объекта Object number	Наименование вещества Name of the material	Вид горючего Type of fuel	H_f , кДж/кг H_f , kJ/kg	Нормальная скорость распространения пламени, м/с Normal flame Spreading rate, m/s	HRRPUA, кВт/м ² HRRPUA, kW/m ²
1	Метанол Methanol	ЛВЖ Flammable liquid	39 784	0,572	954,8
2	Нефть Oil	ЛВЖ Flammable liquid	46 024	0,35	1104,6
3	Нефть Oil	ЛВЖ Flammable liquid	44 769	0,35	1074,5

Таблица 2. Материалы
Table 2. Materials

Номер объекта Object number	Конструкция Construction	Профиль Cross-section	Сталь Steel	Нагрузка, т Load, t	Длина элемента, м Element's length, m
1	Стойка Column	219 × 8 (ГОСТ 10704–91 ⁹) (GOST 10704–91 ⁹)	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93 ¹⁰) (GOST 8509–93 ¹⁰)	7,15	2,2
	Раскос Diagonal web element	75 × 5 (ГОСТ 10704–91 ⁹) (GOST 10704–91 ⁹)	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93 ¹⁰) (GOST 8509–93 ¹⁰)	1,3	2,4
2	Стойка Column	159 × 6 (ГОСТ 10704–91 ⁹) (GOST 10704–91 ⁹)	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93 ¹⁰) (GOST 8509–93 ¹⁰)	3	1,2
3	Стойка Column	159 × 6 (ГОСТ 10704–91 ⁹) (GOST 10704–91 ⁹)	345-9-09Г2С / 345-9-09G2S (ГОСТ 8509–93 ¹⁰) (GOST 8509–93 ¹⁰)	0,5	0,5

водородном режиме осуществлялся согласно уравнениям ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014¹¹ и задавался как граничные условия 1-го рода.

В ПО STATISTICA построены графики поверхностей с временем, расстоянием и температурой в качестве осей X , Y и Z .

Материалы. Рассматриваемые эстакадные сооружения выполнены из стали. Профили проката и действующая на несущие стальные конструкции нагрузка приведена в табл. 2 и извлечена из разделов проектной документации на месторождения.

Результаты и их обсуждение

Месторождение № 1

Для месторождения № 1 в части обеспечения пожарной безопасности требовалась разработка СТУ в связи с сокращением расстояний между скважинами при отступлении от требований нормативных документов, а также в связи с превышением количе-

ства скважин на кустовой площадке. Наиболее опасным сценарием являлась разгерметизация участка трубопровода с образованием дефектного отверстия характерного размера. Частота разгерметизации участков проектируемого трубопровода определена с учетом образования различных видов разгерметизации и внутреннего диаметра трубопровода.

Сценарий пожара пролива, характеризующийся максимальной зоной распространения поражающих факторов — сценарий 1.1 с площадью пролива 376,1 м². Сценарием с наиболее вероятной аварийной ситуацией, согласно проектной документации, является сценарий 1.2 с площадью пролива 46,9 м². Характеристики сценариев приведены в табл. 3.

Согласно СТО Газпром 2-2.3-400–2009¹², п. 9.2.2.6 «с целью снижения повышенной трудоемкости проведения расчетов, связанных с нестационарностью процесса истечения газа и, следовательно, изменением во времени размеров пламени и теплового потока, рекомендуется расчеты теплового потока проводить для постоянного значения интенсивности истечения, соответствующего рекомендуемому моменту времени

⁹ ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные.

¹⁰ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные.

¹¹ ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы.

¹² СТО Газпром 2-2.3-400–2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром».

Таблица 3. Сценарии для месторождения № 1
Table 3. Scenarios for field No. 1

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
1.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	15,213	15,213	10,5 кВт/м ² — 30,9 м; 1,4 кВт/м ² — 55,8 м 10.5 kW/sq. m — 30.9 m; 1.4 kW/sq. m — 55.8 m
1.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	1,896	1,896	10,5 кВт/м ² — 12,8 м; 1,4 кВт/м ² — 21,8 м 10.5 kW/sq. m — 12.8 m; 1.4 kW/sq. m — 21.8 m

(отсчет времени — от момента разрыва газопровода), зависящему от диаметра газопровода».

В результате анализа исходной документации выбран наиболее опасный сценарий и построена полевая расчетная модель с учетом конструктивного решения. На рис. 3 представлен фрагмент генплана с зонами действия поражающих факторов с интен-

сивностью 10 и 100 кВт/м². Наиболее подвержены тепловому потоку продольные балки и сам трубопровод, на поверхности которых плотность теплового потока может достигать 180 кВт/м² (рис. 4). В представленном сценарии воздействию теплового излучения помимо самой конструкции эстакады газосборной и метаноопроводной сети подверга-

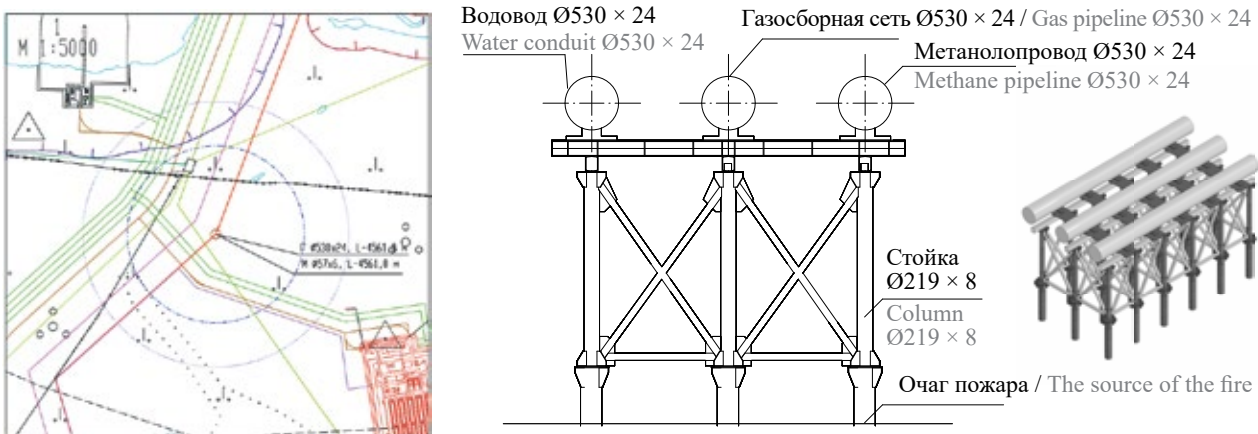


Рис. 3. Зоны действия теплового потока для сценария 1.1 и схема эстакады в ПО Revit
Fig. 3. Heat flow zones for scenario 1.1 and the scheme of the pipe racks in Revit software

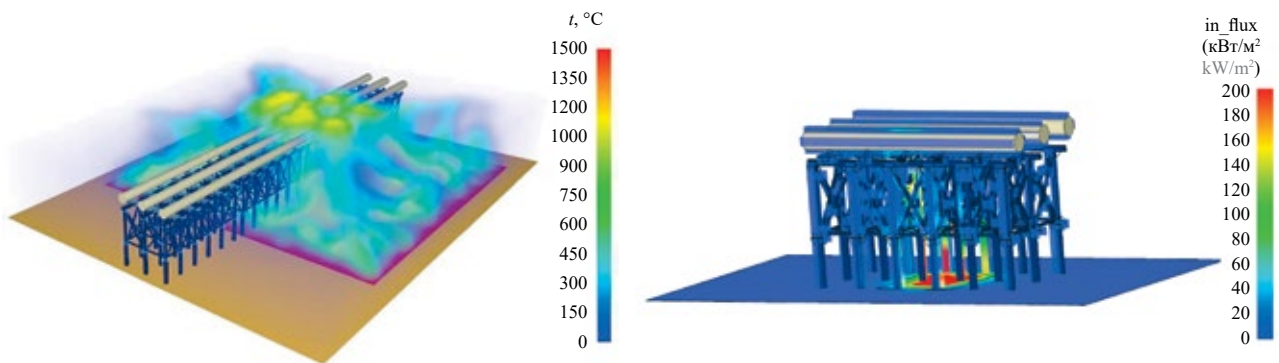


Рис. 4. Распространение опасных факторов пожара в модели (температура, тепловой поток)
Fig. 4. Distribution of fire hazards in the model (temperature, heat flux)

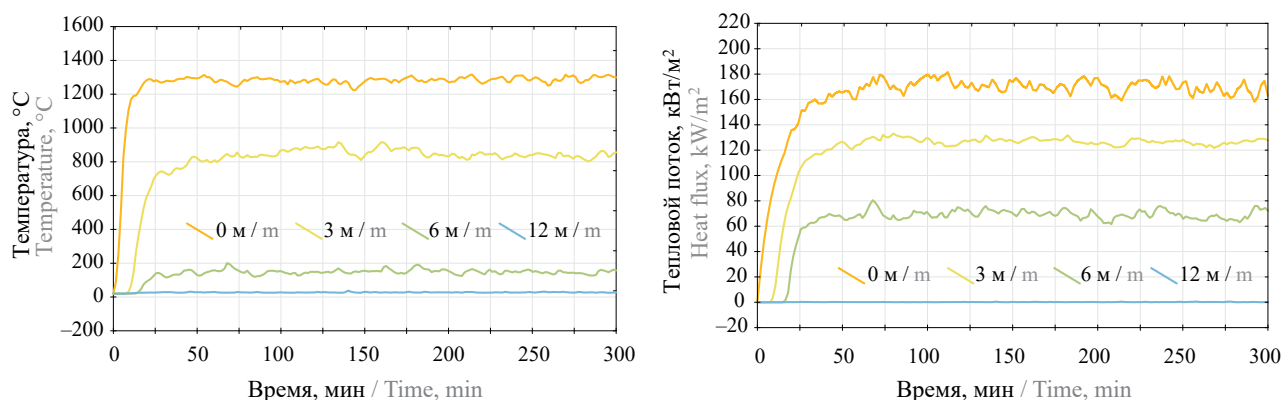


Рис. 5. Графики зависимости температуры и теплового потока от времени
Fig. 5. Dependence of temperature and heat flow on time

ются также проектируемая линия электропередач 10 кВт и автомобильная дорога.

На рис. 5 приведены графики зависимости плотности теплового потока и температуры от времени на уровне нижней балки. Для получения точных количественных данных на уровне трубопроводов получен график зависимости плотности теплового потока от времени.

Данный расчет проводится с целью определения значений ОФП на поверхности конструкций для определения пожарозащитных мероприятий.

Расчет критической температуры стальной конструкции произведен в соответствии с проектом СП¹³ (окончательная редакция размещена на портале Росстандарта).

Расчет температурного коэффициента снижения прочности стали с учетом устойчивости элементов сплошного сечения при центральном сжатии силой N следует выполнять по формуле:

$$\gamma_T = \frac{N}{\phi_y A R_{yn}},$$

где A — площадь сечения брутто;

ϕ_y — коэффициент устойчивости при центральном сжатии, значение которого при $\bar{\lambda} \geq 0,6$ следует определять по п. 7.1.3 СП 16.13330¹⁴, где $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_{yn} / E}$ — условная гибкость стержня. Гибкость стержня определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i},$$

где μ — коэффициент приведения длины, зависящий от условий закрепления стержня;

l — длина стержня;

i — радиус инерции сечения;

¹³ СП «Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости».

¹⁴ СП 16.13330.2017. СНиП II-23-81* Стальные конструкции.

$$\lambda = \frac{1 \cdot 2,2}{0,074653} = 29,5;$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{R_{yn}}{E}} = 29,5 \sqrt{\frac{345\,000}{206\,010\,000}} = 1,2;$$

$$\phi_y = \frac{0,5 \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}^2} \right)}{\bar{\lambda}^2};$$

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2,$$

где α , β — коэффициенты, определяемые в зависимости от типов сечений.

$$\alpha = 0,03, \beta = 0,06;$$

$$\delta = 9,87(1 - 0,03 + 0,06 \cdot 1,2) + 1,2^2 = 11,74;$$

$$\phi_y = \frac{0,5 \left(11,74 - \sqrt{11,74^2 - 39,48 \cdot 1,2^2} \right)}{1,2^2} = 0,96;$$

$$\gamma_T = \frac{71\,500}{0,96 \cdot 0,02121 \cdot 34\,500\,000} = 0,1017,$$

где $\delta_{пр}$ — приведенная толщина металла стальной конструкции, мм.

Критическая температура нагрева сечения, °С, при центральном растяжении или сжатии элемента по потере несущей способности определяется по величине коэффициента γ_T по табл. Б1 проекта СП¹³ и составила $T_{кр} = 695$ °С.

Для стальных конструкций без огнезащиты время прогрева определяется с использованием графиков (номограмм) прогрева стальных конструкций различной приведенной толщины или расчетным методом.

При $\delta = 3,92$ мм критическая температура прогрева балки при воздействии пожара $T_{кр} = 695$ °С будет достигнута в момент времени воздействия пожара, равный:

$$t = t_{fs} = R16.$$

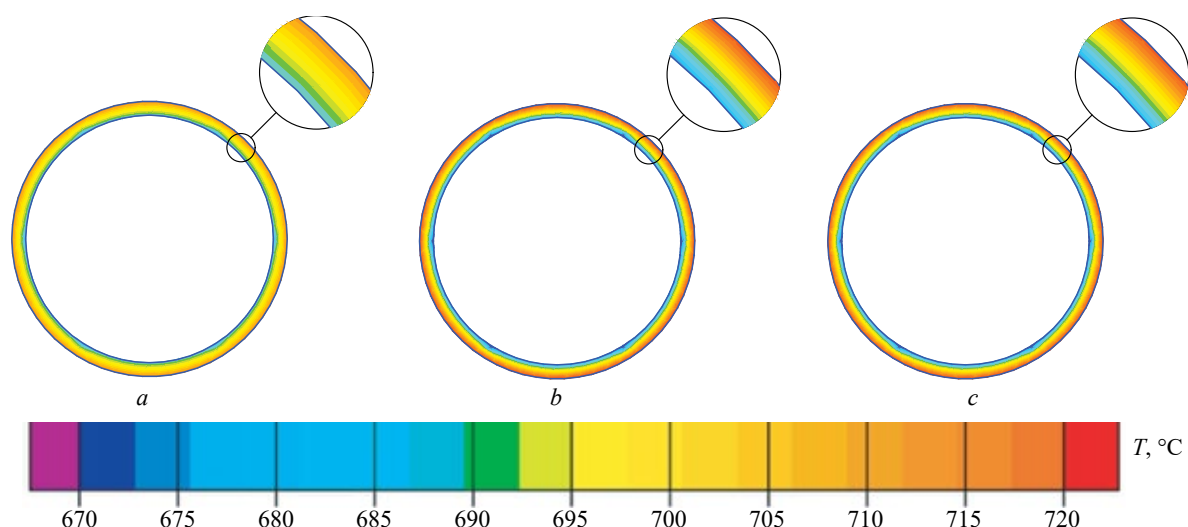


Рис. 6. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 4,5 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин

Fig. 6. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.5 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

Таблица 4. Пределы огнестойкости конструкции

Table 4. Fire resistance limits of the structure

Конструкция Construction	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{cr}, ^\circ\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестойко- сти при стандартном режиме пожара R_s , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_s , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический предел огнестойкости $R_{ф}$, мин The actual fire resistance limit R_F , min
Стойка Column	695	60	16	4,5	2,8

Однако в СП¹³ представлена номограмма прогрева конструкций при стандартном режиме пожара.

В работе [9] найдено приближенное соотношение между температурами конструкций при воздействии стандартного и углеводородного пожаров:

$$t_h = 0,28t_s;$$

$$t = 0,28t_s = R4,5.$$

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 6.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 4.

Месторождение № 2

Сценарий наиболее опасной аварийной ситуации (рис. 7) — разрушение нефтегазосборного трубопро-

Таблица 5. Сценарии для месторождения № 2

Table 5. Scenarios for field No. 2

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
2.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	11,548	11,548	10,5 кВт/м ² — 21,1 м, 1,4 кВт/м ² — 39,2 м 10.5 kW/sq. m — 21.1 m, 1.4 kW/sq. m — 39.2 m
2.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	6,904	6,904	10,5 кВт/м ² — 18,3 м, 1,4 кВт/м ² — 33,9 м 10.5 kW/sq. m — 18.3 m, 1.4 kW/sq. m — 33.9 m

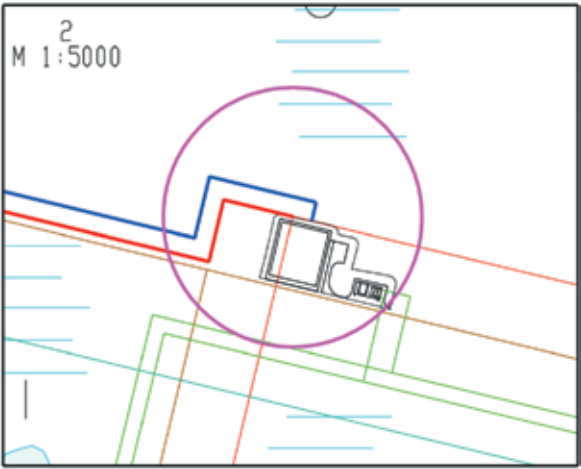
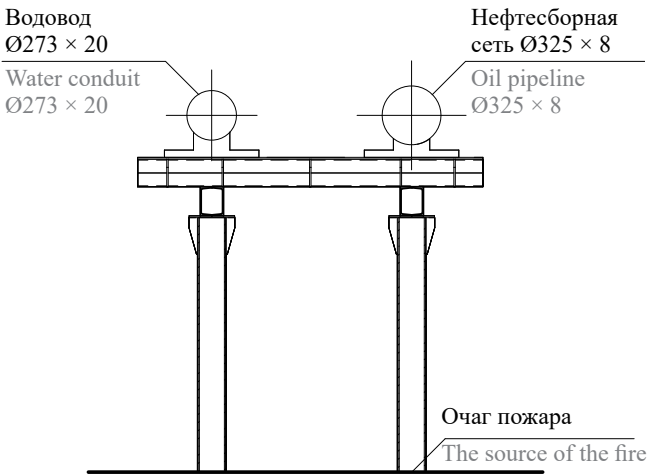


Рис. 7. Сценарий 2.1
Fig. 7. Scenario 2.1



вода диаметром 325 мм с возникновением вспышки облака ГПВС. Радиус зоны воздействия высокотемпературных продуктов сгорания — 100,3 м. Сценарий пожара пролива 2.1 имеет площадь разлива 67,4 м².

Сценарий наиболее вероятной аварийной ситуации — выброс опасного вещества при разгерметизации нефтегазоборного трубопровода диаметром 219 мм. Сценарий пожара пролива 2.2 имеет площадь разлива 40,3 м². Характеристики сценариев приведены в табл. 5.

$$\gamma_T = \frac{30\,000}{0,87 \cdot 0,0115 \cdot 34\,500\,000} = 0,09.$$

Критическая температура нагрева сечения составила $T_{кр} = 700\,^{\circ}\text{C}$.

Модель эстакады в Revit и PyroSim приведена на рис. 8.

При $\delta = 2,94\text{ мм}$ критическая температура прогрева балки при воздействии пожара $T_{кр} = 700^{\circ}$ будет достигнута в момент времени воздействия пожара, равный:

$$t = t_{fs} = R15;$$

$$t_h = 0,28t_s;$$

$$t = 0,28t_s = R4,2.$$

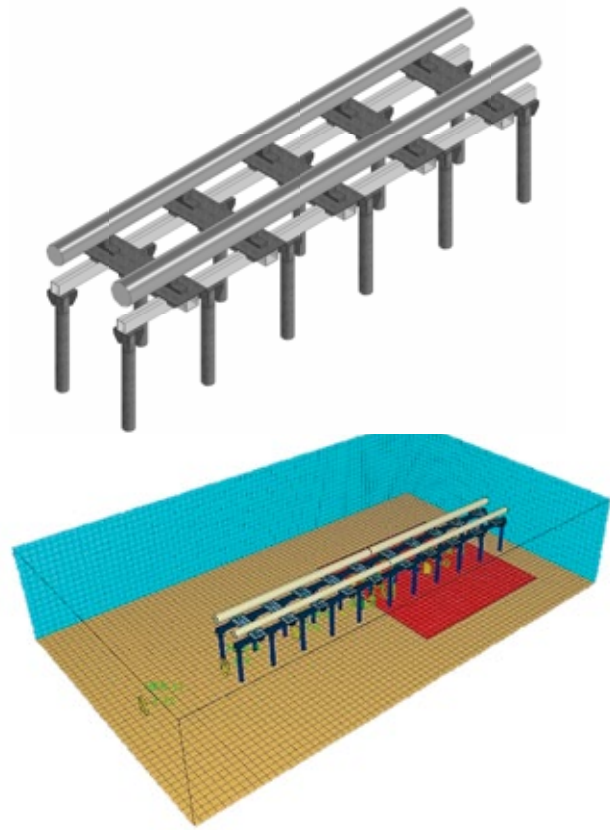


Рис. 8. Результаты моделирования в Revit и PyroSim
Fig. 8. Simulation results in Revit and PyroSim

Таблица 6. Предел огнестойкости конструкции
Table 6. Fire resistance limit of the structure

Номер Number	Конструкция Construction	$T_{кр},\,^{\circ}\text{C}$ $T_{cr},\,^{\circ}\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестой- кости при стан- дартном режиме пожара R_s , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_s , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический пре- дел огнестойкости R_F , мин The actual fire resistance limit R_F , min
1	Стойка Column	700	60	15	4,2	2,5

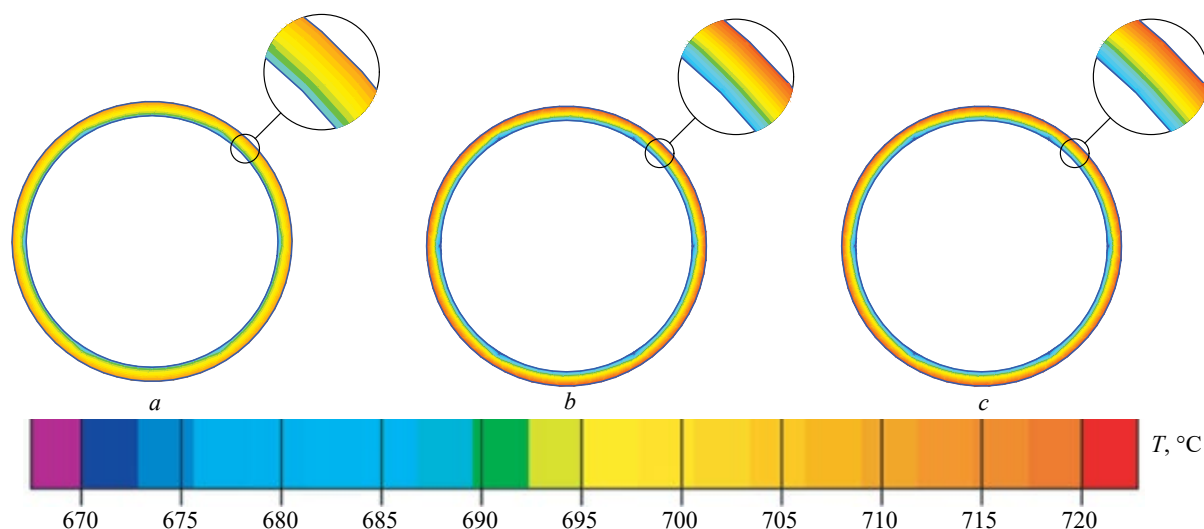


Рис. 9. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 4,2 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин

Fig. 9. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.2 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

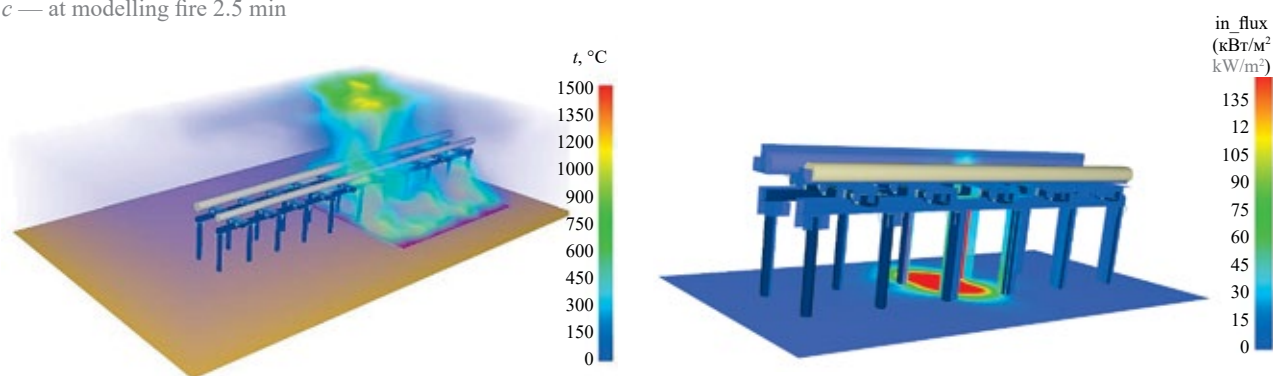


Рис. 10. Значение распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности конструкций

Fig. 10. Distribution of temperature and heat flux density on the surface of structures

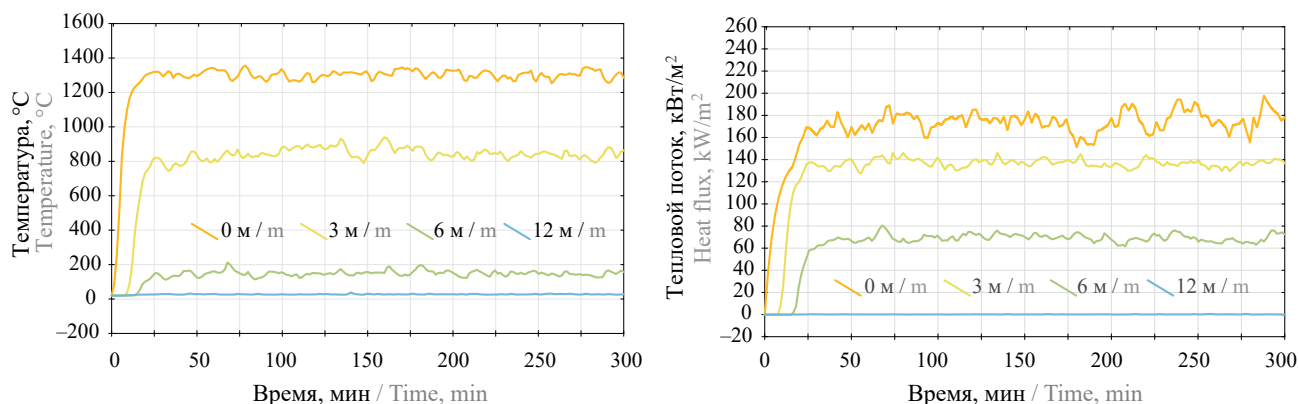


Рис. 11. Графики зависимости теплового потока и температуры от времени

Fig. 11. Dependence of heat flow and temperature on time

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 9.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 6.

Полученные в Pygosim модели распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности конструкций приведены на рис. 10.

Результаты измерений в виде графиков зависимости плотности теплового потока и температуры от времени представлены на рис. 11.

Месторождение № 3

Для нефтегазоконденсатного месторождения № 3 рассматривались определенные кусты скважин, СТУ



Рис. 12. Нефтепровод месторождения № 3
Fig. 12. Oil pipeline of field No. 3

Таблица 7. Сценарии для месторождения № 3
Table 7. Scenarios for field No. 3

Номер сценария Scenario number	Последствия Effects	Основной поражающий фактор The main damaging factor	Количество опасного вещества, участвующего в аварии, т The amount of dangerous substance involved in the accident, t	Количество опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т The amount of dangerous substance involved in the creation of fire hazards, t	Зоны действия теплового потока Zones of effect of the heat flow
3.1	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	16,80	16,80	10,5 кВт/м ² — 7,57 м, 1,4 кВт/м ² — 29,05 м 10.5 kW/sq. m — 7.57 m, 1.4 kW/sq. m — 29.05 m
3.2	Пожар пролива Pool fire	Тепловое излучение Heat radiation	23,92	23,92	10,5 кВт/м ² — 6,87 м, 1,4 кВт/м ² — 32,76 м 10.5 kW/sq. m — 6.87 m, 1.4 kW/sq. m — 32.76 m

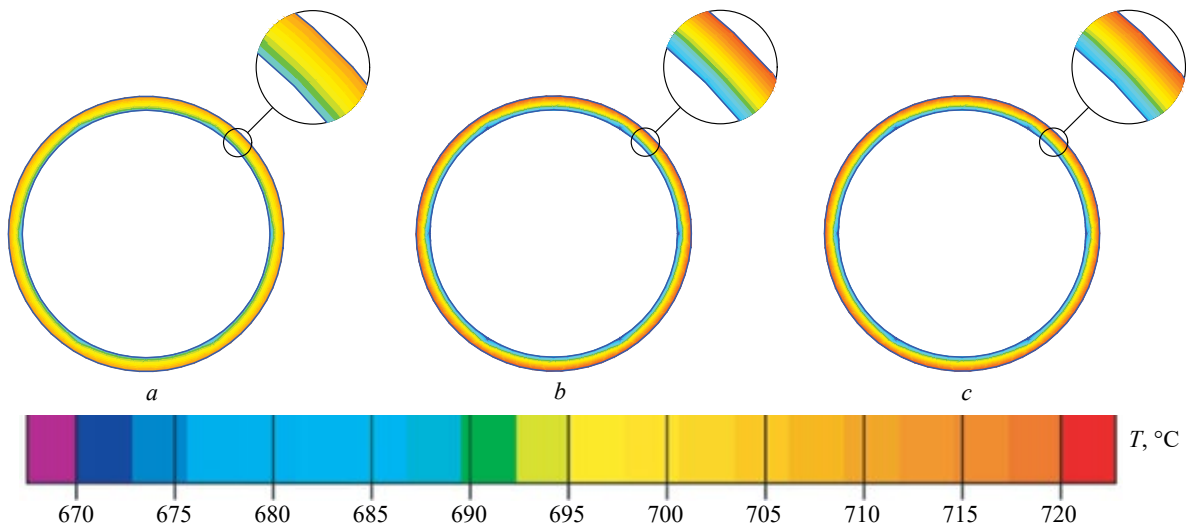


Рис. 13. Распределение температуры по сечению стойки: *a* — при стандартном температурном режиме 15 мин; *b* — при углеводородном режиме 3 мин; *c* — при моделируемом пожаре 2 мин
Fig. 13. Temperature distribution over the cross section of the rack: *a* — at cellulosic fire 15 min; *b* — at hydrocarbon fire 4.2 min; *c* — at modelling fire 2.5 min

Таблица 8. Предел огнестойкости конструкции
Table 8. Fire resistance limit of the structure

Конструкция Construction	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{cr}, ^\circ\text{C}$	Требуемый предел огнестойкости $R_{тр}$, мин Required fire resistance limit R_r , min	Предел огнестойко- сти при стандартном режиме пожара R_S , мин The fire resistance limit in the standard fire mode is R_S , min	Предел огнестойкости при углеводородном режиме пожара R_H , мин Fire resistance limit in hydrocarbon fire mode R_H , min	Фактический предел огнестойкости $R_{ф}$, мин The actual fire resistance limit R_f , min
Стойка Column	700	60	15	4,2	2,5

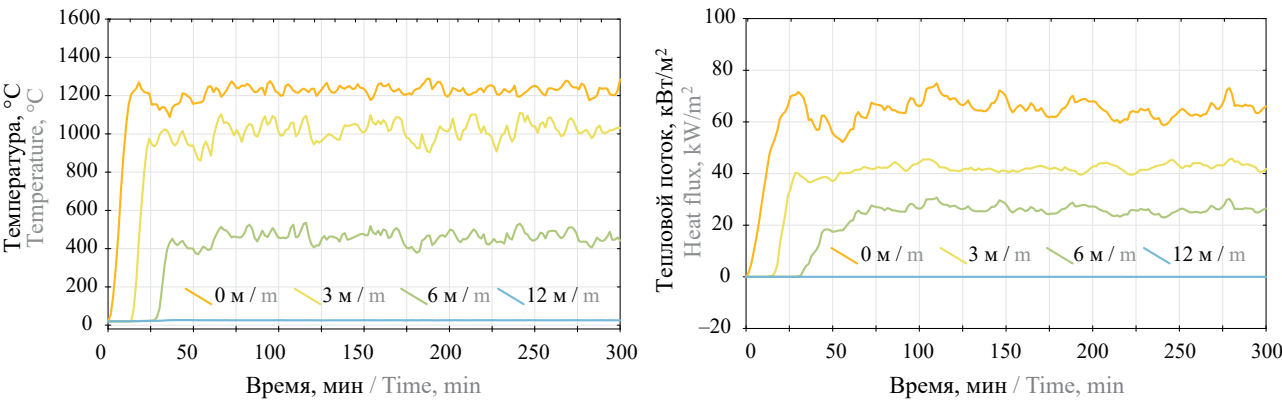


Рис. 14. Зависимости теплового потока и температуры от времени
Fig. 14. Dependences of heat flow and temperature on time

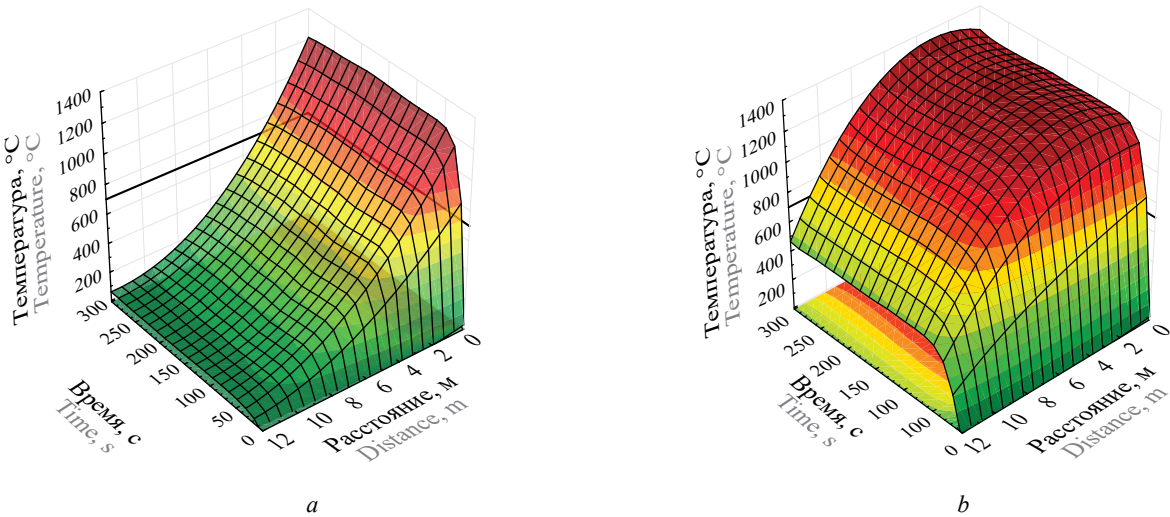


Рис. 15. Графики распределения температуры от времени и расстояния от очага пожара для: *a* — самого вероятного сценария № 2.2 (43,18 МВт); *b* — самого опасного сценария № 1.1 (305,24 МВт)
Fig. 15. Temperature distribution from time and distance from the fire source for: *a* — the most likely scenario — No. 2.2 (43.18 MW); *b* — the most dangerous scenario — No. 1.1 (305.24 MW)

не разрабатывалось. Модель трубопровода в Revit приведена на рис. 12.

Сценарий с наиболее вероятной аварийной ситуацией является 3.1 (табл. 7), пожар пролива при разгерметизации нефтегазосборного трубопровода при переходе через водную преграду в точке максимального разлива. Площадь испарения НГЖС с поверхности земли при сценарии 3.1 — 91,32 м². Сценарий наиболее опасной аварийной ситуации — 3.2 с площадью пролива 129,15 м².

Распределения температуры по сечению стойки при разных режимах пожара приведены на рис. 13.

Полученные пределы огнестойкости сведены в табл. 8.

Результаты измерений в виде графиков зависимости плотности теплового потока и температуры от времени представлены на рис. 14.

Итоговые графики распределения температуры от времени и расстояния от очага пожара для самого

вероятного сценария и самого опасного сценария приведены на рис. 15.

Серая область на рис. 15 показывает критическую температуру стальной конструкции и ее достижение в зависимости от расстояния от очага пожара.

Горизонтальный и вертикальный размер зоны воздействия пожара принимается равным (API 2218): 12 м для горючих сжиженных газов и ЛВЖ; 9 м для горючих жидкостей, нагретых выше температуры вспышки или температуры самовоспламенения (в зависимости от того, какая температура ниже) и 6 м для остальных горючих жидкостей.

Согласно табл. 9 и рис. 13, 14, огнезащита конструкций эстакад для обеспечения огнестойкости R60 требуется на расстоянии не более 10,7 м при очаге пожара 305,24 МВт; при очаге 38,6 МВт достижение критической температуры достигается до 3 м включительно. Размеры зоны воздействия пожаров следует рассчитывать согласно сценариям развития пожара и соответствующей горючей нагрузке в виду того, что значения, приводимые в норме API 2218, не всегда коррелируют с зонами, полученными в моделях пожаров.

Выводы

По окончании работы получены следующие результаты:

1. На основе анализа научно-технической литературы выявлено, что вероятностный подход является перспективным методом, позволяющим оптимизировать проектирование огнезащиты стальных конструкций в зависимости от определяемого фактического предела огнестойкости.

2. Разработаны модели пожара розлива нефти на технологических этажерках объектов нефтегазовой отрасли. Согласно проектной документации на объекты, определены зоны воздействия пожара и рассчитаны пределы огнестойкости стальных конструкций при «реальном», стандартном и углеводородном режиме пожара. Показано, что для объектов нефтегазовой промышленности не следует применять стандартный (целлюлозный) режим пожара, так как огнестойкость конструкций при таком подходе завышается в 5 раз.

3. Использование методики для расчета огнестойкости конструкций в действующих нормативных документах безотносительно к виду проектной аварии, во время ликвидации которой сооружение не должно потерять устойчивость, может привести к ошибочным результатам. Вследствие этого при проектировании сооружений эстакад, этажерок и наружных установок со взрывоопасным оборудованием следует четко определять вид максимальной проектной аварии.

4. Определение мест расположения зон воздействия пожара должно осуществляться в проекте, но методика определения зон воздействия пожара в настоящее время отсутствует, так же как и методика определения фактических пределов огнестойкости для конструкций вне помещений. Представляется целесообразным для каждого защищаемого технологического участка согласно определяемой зоны воздействия пожара проводить расчеты с использованием программных продуктов, реализующих полевою модель с возможностью расчета в окружающей среде.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотилов А.В., Павлов В.В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 3. С. 49–57. EDN SFOCF.
2. Абрамов И.В., Гравит М.В., Гуменова Э.И. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме // Газовая промышленность. 2018. № 5. С. 106–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-predelov-ognestoykosti-sudovyh-i-stroitelnyh-konstruktsiy-pri-uglevodorodnom-temperaturnom-rezhime> (дата обращения: 27.03.2024).
3. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 URL: [ravnitelnyy-analiz-trebovaniy-rossii-i-ssha-k-ognestoykosti-stroitelnyh-konstruktsiy-neftepererabatyvayuschih-i-neftehimicheskikh](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22) (дата обращения: 27.03.2024).
4. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907
5. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2020. Vol. 37. Issue 1. Pp. 203–212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y

6. Шебеко А.Ю. Оценка требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций этажек и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли // Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 103–107. EDN YZZZML.
7. Shi J., Dao J., Jiang L., Pan Z. Research on IFC- and FDS-based information sharing for building fire safety analysis // *Advances in Civil Engineering*, 2019. Vol. 2019. Issue 1. DOI: 10.1155/2019/3604369
8. Rengel B., Mata C., Pastor E., Casal J., Planas E. A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 56. Pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.002
9. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // *Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
10. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions // *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173. DOI: 10.3390/fire7060173
11. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажек предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2021. Т. 30. № 5. С. 58–65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65
12. Li L., Luo J., Wu G., Li X., Ji N., Zhu L. Impact assessment of flammable gas dispersion and fire hazards from LNG Tank Leak // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2021/4769552
13. Santos F.da, Landesmann A. Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire // *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 69. Pp. 57–68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.010
14. Tong S.-jiao, Wu Z.-zhi, Wang R.-jun, Wu H. Fire risk study of long-distance oil and gas pipeline based on QRA // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. Pp. 368–374. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.144
15. Pio G., Carboni M., Iannaccone T., Cozzani V., Salzano E. Numerical simulation of small-scale pool fires of LNG // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 61. Pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.06.002
16. Lim J.W., Baalisampang T., Garaniya V., Abbassi R., Khan F., Ji J. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103970. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103970
17. Manco M.R., Vaz M.A., Cyrino J.C.R., Landesmann A. Evaluation of localized pool fire models to predict the thermal field in offshore topside structures // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 42 (12). DOI: 10.1007/s40430-020-02694-8
18. Chandrasekaran S., Pachaiappan S. Numerical analysis and preliminary design of topside of an offshore platform using FGM and X52 steel under special loads // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020. Vol. 5 (3). DOI: 10.1007/s41062-020-00337-4
19. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гордиенко Д.М. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // *Пожарная безопасность/ Fire Safety*. 2015. № 1. С. 31–39. EDN TLITON.

REFERENCES

1. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):49-57. EDN SFOCFF (rus).
2. Abramov I.V., Gravit M.V., Gumerova E.I. Increase in the fire resistance limits of ship and building structures with hydrocarbon fire. *Gas Industry Magazine*. 2018; 5:106-115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-pre-delov-ognestoykosti-sudovyh-i-stroitelnyh-konstruktsiy-pri-uglevodorodnom-temperaturnom-rezhime> (accessed: 27.03.2024). (rus).
3. Klementev B., Kalach A., Gravit M. A comparative analysis of the requirements of Russia and the United States to the fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 URL: [ravnitelnyy-analiz-trebovaniy-rossii-i-ssha-k-ognestoykosti-stroitelnyh-konstruktsiy-neftepererabatyvayushih-i-neftehimicheskikh](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22) (accessed: 27.03.2024). (rus).
4. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2022; 80:104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907
5. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2020; 37(1):203-212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y
6. Shebeko A.Yu. Estimation of required fire resistance limits of bearing structures of refinery platforms and pipe racks. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2019; 1:103-107. EDN YZZZML (rus).

7. Shi J., Dao J., Jiang L., Pan Z. Research on IFC- and FDS-Based information sharing for building fire safety analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019(1). DOI: 10.1155/2019/3604369
8. Rengel B., Mata C., Pastor E., Casal J., Planas E. A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 56:18-31. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.002
9. Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
10. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024; 7:173. DOI: 10.3390/fire7060173
11. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban A.V. The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):58-65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65 (rus).
12. Li Lifeng, Luo Jinheng, Wu Gang, Li Xinhong, Ji Nan, Zhu Lixia. Impact assessment of flammable gas dispersion and fire hazards from LNG tank leak. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021; 2021:1-15. DOI: 10.1155/2021/4769552
13. Santos F.da, Landesmann A. Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2014; 69:57-68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.010
14. Tong S.-jiao, Wu Z.-zhi, Wang R.-jun, Wu H. Fire risk study of long-distance oil and gas pipeline based on QRA. *Procedia Engineering*. 2016; 135:368-374. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.144
15. Pio G., Carboni M., Iannaccone T., Cozzani V., Salzano E. Numerical simulation of small-scale pool fires of LNG. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 61:82-88. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.06.002.
16. Lim J.W., Baalisampang T., Garaniya V., Abbassi R., Khan F., Ji J. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103970. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103970
17. Manco M.R., Vaz M.A., Cyrino J.C.R., Landesmann A. Evaluation of localized pool fire models to predict the thermal field in offshore topside structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020; 42(12). DOI: 10.1007/s40430-020-02694-8
18. Chandrasekaran S., Pachaiappan S. Numerical analysis and preliminary design of topside of an offshore platform using FGM and X52 steel under special loads. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020; 5(3). DOI: 10.1007/s41062-020-00337-4
19. Shebeko A.Yu. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:31-39. (rus).

Поступила 24.07.2024, после доработки 30.07.2024;

принята к публикации 02.08.2024

Received July 24, 2024; Received in revised form July 30, 2024;

Accepted August 2, 2024

Информация об авторах

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; РИНЦ ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

МАМЕДОВ Эльдар Захирович, студент Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Marina V. GRAVIT, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politeknicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Eldar Z. MAMEDOV, Student of Civil Engineering Institute, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politeknicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Система мониторинга и прогнозирования пожароопасных состояний мест размещения и накопления твердых коммунальных отходов при их захоронении и транспортировке

Людмила Анатольевна Королева^{1,2}✉, Андрей Геннадьевич Хайдаров³

¹ 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, г. Санкт-Петербург, Россия

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

³ ООО «Аналитические системы», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Пожары на объектах размещения и накопления твердых коммунальных отходов (ТКО) при их захоронении и транспортировке возникают с достаточной регулярностью. В настоящее время они практически не прогнозируются. Их обнаружение в большинстве случаев происходит, когда горение распространилось на значительные площади.

Цель и задачи. Разработка системы мониторинга и прогнозирования состояния мест размещения и накопления ТКО, позволяющей обнаруживать очаги горения, прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности рассматриваемых объектов.

Материалы и методы. Проведен сравнительный анализ систем мониторинга мест размещения и накопления ТКО. Доказано, что наиболее перспективными для предупреждения возникновения пожароопасных ситуаций на рассматриваемых объектах являются методы прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей и машинного обучения. Определены этапы рабочего процесса при реализации технологии машинного обучения.

Результаты. Разработана система показателей для оценки пожароопасных состояний мест размещения и накопления отходов. Создана модель, позволяющая на основе полученных с датчиков данных прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности мест размещения и накопления отходов с учетом выбранного горизонта планирования. Определены требования к модели, выполняемые задачи, проведены сбор и очистка данных, маркировка, конструирование признаков. Проведено обучение модели и ее оценка. Обоснован метод обнаружения аномалий на основе обучения без учителя.

Разработана модель, позволяющая на основе полученных с датчиков данных обнаруживать очаги горения, в том числе скрытые, с указанием их местоположения и границ. Представлены характеристики основных сценариев, определяющих структуру и использование сервиса «Умный полигон». Разработана его архитектура. Обоснованы преимущества использования. Проведено тестирование разработанных моделей.

Выводы. Применение сервиса «Умный полигон» позволит визуализировать информацию о состоянии мест захоронения отходов и результатах прогнозирования; сформировать отчет по полигону за выбранный период; осуществлять своевременное оповещение и передачу необходимой информации о возможности или возникновении горения; выбирать наилучшие решения, направленные на минимизацию пожарного риска и проводить контроль их эффективности.

Результаты проведенного исследования войдут в качестве модуля в состав комплексной платформы для риск-ориентированного прогнозирования, снижения экологической и пожарной опасности мест размещения и накопления ТКО.

Ключевые слова: полигон; свалка; горение; машинное обучение; модель; искусственная нейронная сеть; сервис «Умный полигон»; платформа

Для цитирования: Королева Л.А., Хайдаров А.Г. Система мониторинга и прогнозирования пожароопасных состояний мест размещения и накопления твердых коммунальных отходов при их захоронении и транспортировке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 52–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.52-68

✉ Королева Людмила Анатольевна, e-mail: lyudamil@mail.ru

System of monitoring and predicting of fire hazardous conditions of municipal solid waste disposal and accumulation sites during their disposal and transportation

Lyudmila A. Koroleva^{1,2}✉, Andrey G. Khaydarov³

¹ Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Saint Petersburg, Russian Federation

² Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

³ Limited Liability Company "Analytical systems", Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Fires at disposal and accumulation sites of municipal solid waste (MSW) during their disposal and transportation occur with sufficient regularity. At present, they are practically not predicted. Their detection in many cases occurs when the burning has spread over significant areas.

Aims and objectives. The aim of the work is to develop a system of monitoring and forecasting of conditions of places of disposal and accumulation of MSW that enables to detect burning areas, to forecast the dynamics of changes in key parameters and to assess fire danger of the objects in question.

Materials and methods. A comparative analysis of monitoring systems for places of disposal and accumulation of MSW was made. It is proved that forecasting methods based on artificial neural networks and machine learning are the most promising for preventing fire-hazardous situations at the examined objects. The stages of the working process in the implementation of machine learning technology are defined.

Results. A system of indicators for assessing the fire hazardous conditions of waste disposal and accumulation sites is developed. A model allowing to forecast the dynamics of change of key parameters and to give an assessment of fire hazard of waste disposal and accumulation sites taking into account the chosen planning horizon on the basis of the data received from sensors is created. The requirements for the model, the tasks to be performed were determined, data gathering and cleaning, labelling, design of attributes were performed. The model was trained and evaluated. A method of anomaly detection based on teacherless learning was justified.

A model was developed that allows detecting combustion spots, including hidden ones, with indication of their location and boundaries, based on the data received from sensors. Characteristics of the main scenarios determining the structure and use of the Smart Site service are presented. Its architecture is described. Benefits of its usage are proved. The developed models are tested.

Conclusion. The application of the "Smart Polygon" service will enable visualization of information about the state of waste disposal sites and forecasting results; generate a report for the polygon for a selected period; provide timely notification and transfer necessary information about the possibility or occurrence of fires; select the best solutions aimed at minimizing fire risk and monitor their effectiveness.

The results of the study will be included as a module in an integrated platform for risk-oriented forecasting, reduction of environmental and fire hazard of disposal sites and accumulation of solid waste.

Keywords: polygon; combustion; machine learning; model; artificial neural network; "Smart Polygon" service; platform

For citation: Koroleva L.A., Khaydarov A.G. System of monitoring and predicting of fire hazardous conditions of municipal solid waste disposal and accumulation sites during their disposal and transportation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):52-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.52-68 (rus).

✉ Lyudmila Anatolyevna Koroleva, e-mail: lyudamil@mail.ru

Введение

Обращение с твердыми коммунальными отходами (ТКО) является глобальной проблемой, не решенной в Российской Федерации (РФ) и большинстве стран мирового сообщества [1–3]. Проводимая в нашей стране реформа в сфере обращения с отходами «не принесла ожидаемых результатов», ситуация с полигонами «близка к критической», около 90 % мусора вывозится на захоронение, полигоны в крупных городах переполнены, растет количество и размеры несанкционированных свалок [4]. Огромное количество ТКО нуждаются в транспортировке, утилизации и захоронении.

Полигоны и свалки ТКО, площадки накопления мусора при транспортировке большегрузным транспортом (далее — места размещения и накопления отходов) относятся к объектам повышенной пожарной опасности. По официальной статистике [5], пожары на рассматриваемых объектах составляют около 14 % от общего количества пожаров, происходящих в РФ. На их локализацию и ликвидацию привлекается значительное количество сил и средств, тушение может осуществляться в течение длительного времени (дни, недели, месяцы). Пожары в местах накопления и размещения ТКО приводят к значительным негативным последствиям для окружающей среды и здоровья

населения, сопровождаются большим материальным ущербом.

Обнаружение подземных тлеющих пожаров в большинстве случаев происходит, когда реакция горения уже началась и пожар распространился на значительные площади. На сегодняшний день пожары в местах накопления и размещения ТКО практически не прогнозируются.

В настоящее время активно изучаются вопросы, связанные с возможностью идентифицировать горение по изменению, например, температуры, концентраций кислорода, угарного и углекислого газов, метана^{1, 2} [6–10]. Следует, однако, принять во внимание, что происходящие в местах размещения и накопления отходов физико-химические и биологические процессы не могут учитываться отдельно друг от друга. Например, только по изменению концентрации углекислого газа не представляется возможным сделать заключение о возникновении подземного пожара. Создание эффективной системы мониторинга и прогнозирования должно базироваться на системном подходе, в рамках которого «взаимозависимые события», происходящие на полигоне, «должны рассматриваться одновременно» [11].

Актуальным является развитие технологий мониторинга и прогнозирования состояния мест размещения и накопления отходов, применение которых позволит предотвращать пожары, обеспечивать возможность их тушения на ранней стадии.

Цель работы заключается в разработке системы мониторинга и прогнозирования состояния мест размещения и накопления ТКО, позволяющей обнаруживать очаги горения, прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности рассматриваемых объектов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- проведен сравнительный анализ систем мониторинга мест размещения и накопления ТКО;
- обоснована система показателей для оценки их пожароопасных состояний;
- разработана модель, позволяющая прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности мест размещения и захоронения отходов с учетом выбранного горизонта планирования;
- разработана модель, позволяющая обнаруживать очаги горения, в том числе скрытые, с указанием их местоположения и границ;

¹ Copping S., Quinn C., Gregory R. Review and Investigation of deep-seated fires within landfill sites. Environment Agency, 2007. URL: www.environment-agency.gov.uk (дата обращения: 08.09.23).

² Mogbel S. Characterizing Spontaneous Fires In Landfills. Ph.D. Thesis. USA : University of Central Florida, Orlando, 2009. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/3855/> (дата обращения: 20.08.2022).

- проведено тестирование разработанных моделей и определены перспективы их использования.

Материалы и методы

Проведенный сравнительный анализ систем мониторинга мест размещения и накопления ТКО обусловил выбор методов и моделей. Были рассмотрены реализованные решения, среди которых: система автоматического контроля загазованности полигона ТКО (Инновационная промышленная группа компаний «СервисСофт», Российская Федерация (РФ)); система непрерывного мониторинга выбросов полигонов Landfill Continuous Emissions Monitoring System (компания Los Gatos Research, США); интеллектуальная тепловизионная камера Wastack (Канада); система диспетчерского управления и сбора данных Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) для системы откачки фильтрата полигона (Systems Group Technologies, США); система удаленного мониторинга и управления SCS RMC (SCS Remote Monitoring and Control at Landfills, США); беспилотная авиационная система (БАС) для обнаружения и количественной оценки наземных утечек метана (SnifferDron, Sniffer Robotics, США); система видеомониторинга объектов VIDEOMATIC (группа компаний «Индустрия света», РФ).

Среди находящихся в стадии разработки наиболее перспективными, по нашей оценке, являются: комплексная система мониторинга состояния полигонов отходов для минимизации экологических рисков [12]; система оценки выбросов метана со свалки с использованием беспилотных авиационных систем и полупроводниковых датчиков [13].

Общими недостатками рассмотренных систем являются отсутствие функций прогнозирования возникновения, развития пожара в местах размещения и накопления отходов и поддержки принятия решений, направленных на предотвращение и тушение пожаров. Возможность подключения к системе группы полигонов в большинстве случаев не предусмотрена. Отсутствует функция визуализации полученной информации.

Проведенная оценка применимости различных методов [14], позволяющих реализовать системный подход и совместно учитывать температуру, свойства ТКО и происходящие в теле полигона процессы для прогнозирования пожароопасных ситуаций в местах размещения и накопления ТКО, позволила обосновать следующие выводы:

- методы, использующие линейные модели, не отличаются точностью, не позволяют исследовать всю совокупность происходящих процессов, что существенно ограничивает их применение для оценки процессов самовозгорания в местах размещения и накопления ТКО;



Рис. 1. Этапы рабочего процесса машинного обучения [16]

Fig. 1. Stages of the machine learning workflow [16]

Таблица 1. Система показателей для оценки пожароопасных состояний мест размещения и накопления отходов

Table 1. Indicator system for assessing fire hazardous states of waste disposal and accumulation sites

Зона Zone	Температура, °C Temperature, °C		[CH ₄]/ [CO ₂]	[CO], Ppmv	[O ₂], % об. [O ₂], % vol.	[N ₂], % об. [N ₂], % vol.	Примечание Note
	В устье скважины At the wellhead	В теле полигона In the body of the landfill					
Аэробное разложение Aerobic decomposition	< 80	≤ 90	–	–	> 2	78	Является исходным для мест накопления отходов It is the starting point for places of accumulation of waste
Анаэробное разложение Anaerobic decomposition	< 65	≤ 80	≥ 1	< 20	< 1,5	< 5	Нормальная эксплуатация полигона Normal operation of the polygon
Газовый фронт Gas front	40–55	50–70	1,0– 0,8	0–400	> 1	5–15	Область повышенной тем- пературы может длительное время быть неподвижной. Изменения происходят при проникновении воздуха либо наличия другого триггера The area of increased tem- perature can be stationary for an extended period. Changes occur upon the penetration of air or the presence of another trigger
Температур- ный фронт Temperature front	50–55	65–75	0,8– 0,6	400– 800	> 1	5–15	Повышению температуры предшествует уменьшение соотношения [CH ₄]/[CO ₂] до 0,3 An increase in temperature is preceded by a reduction in the [CH ₄]/[CO ₂] ratio to 0.3
	55–65	70–85	0,6– 0,1	800– 1200	> 1		
	65–90	80–110	< 0,1	1200– 1500	> 1		
Фронт тления Smoldering front	> 65	> 80	< 0,2	≥ 1500	0,7– 3,3	> 15	Измерение подповерхност- ных температур затруднено Measurement of subsurface temperatures is difficult
Зона пиролиза Pyrolysis zone	≥ 170	≥ 190	< 0,1	≥ 1000	0,7– 11,0	–	Возможно протекание эндо- термических процессов Endothermic processes may occur
Зона горения Combustion zone	≥ 170	≥ 190; рост во вре- мени ≥ 190; growth over time	< 0,1	≥ 1000	0,7– 11,0	> 15	Величина скорости измене- ния температуры опре- деляет различия между горением и пиролизом The rate of temperature change determines the differ- ences between combustion and pyrolysis

- метод конечных элементов имеет ряд существенных ограничений: влияние выбора сетки конечных элементов на результаты расчета температурных полей и сложность оценки точности результатов. Метод не позволяет учитывать уникальность объектов;
- наиболее перспективными являются методы прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей и машинного обучения, что подтверждается рядом отечественных и зарубежных исследований [12, 15].

Так, в работе [15] представлена модель искусственной нейронной сети для моделирования и прогнозирования температур поверхности свалки, основанная на использовании спутниковых снимков. Эффективность ее применения подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции, полученными в процессе валидации искусственной нейронной сети. Однако такие модели для мониторинга и прогнозирования подземных пожаров как в РФ, так и за рубежом отсутствуют.

Представленный сравнительный анализ подтверждает необходимость создания систем мониторинга и прогнозирования мест размещения и накопления отходов. Перспективным направлением является применение методов искусственного интеллекта с использованием облачных технологий.

Для выполнения задачи предсказания ключевых параметров была разработана платформа, этапы рабочего процесса которой представлены на рис. 1.

В основе системы лежит итеративный процесс с обратными связями, которые предполагают экспериментирование с различными подходами в рамках ключевых этапов. На основе результатов экспериментов применения различных техник обеспечивается инкрементальное улучшение показателей модели.

На основании литературных данных [6–10, 17–23], была обоснована система показателей, оценка которых позволяет определять возможность возникновения и развития горения (табл. 1). В работе [14] представлены их референтные значения, поддающиеся измерению и контролю.

Рассматриваемые показатели были учтены в разрабатываемых моделях.

Результаты и их обсуждение

1. Разработка модели, позволяющей на основе полученных с датчиков данных прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности мест размещения и накопления отходов с учетом выбранного горизонта планирования

Постановка задачи. Необходимо на основе характеризующих процесс биодеградаций отходов

данных, полученных с установленных на полигоне датчиков, предсказать ключевые параметры для заданного временного горизонта. Задача разрабатываемой модели заключается в предсказании температуры и массовых долей газов (табл. 2).

В качестве входных признаков модели действуют значения рассмотренных параметров за предшествующий временной период заданной длительности и координаты X и Y , определяющие положение точки полигона относительно шахты и дна полигона соответственно. Используемая модель полигона представлена на рис. 2.

Для оценки качества модели применены средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, далее MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n},$$

и средняя квадратичная ошибка (англ. Mean Squared Error, далее MSE):

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n},$$

где y_i — это истинное (измеренное) значение параметра образца i ;

$\hat{y}_i$ — оценочное значение параметра на основе модели;

n — количество образцов в выборке.

Таблица 2. Параметры процесса

Table 2. Process Parameters

Обозначение Designation	Наименование Name	Единица измерения Unit of Measurement
Q_10	Объемный расход жидкости Liquid Flow Rate	м³/с m³/s
Q_g0	Объемный расход газа Gas Flow Rate	м³/с m³/s
T	Температура Temperature	°C
w_CH ₄	Массовая доля метана Methane Mass Fraction	Безразмерный Dimensionless
w_CO ₂	Массовая доля углекислого газа Carbon Dioxide Mass Fraction	Безразмерный Dimensionless
w_N ₂	Массовая доля азота Nitrogen Mass Fraction	Безразмерный Dimensionless
w_O ₂	Массовая доля кислорода Oxygen MaFraction	Безразмерный Dimensionless

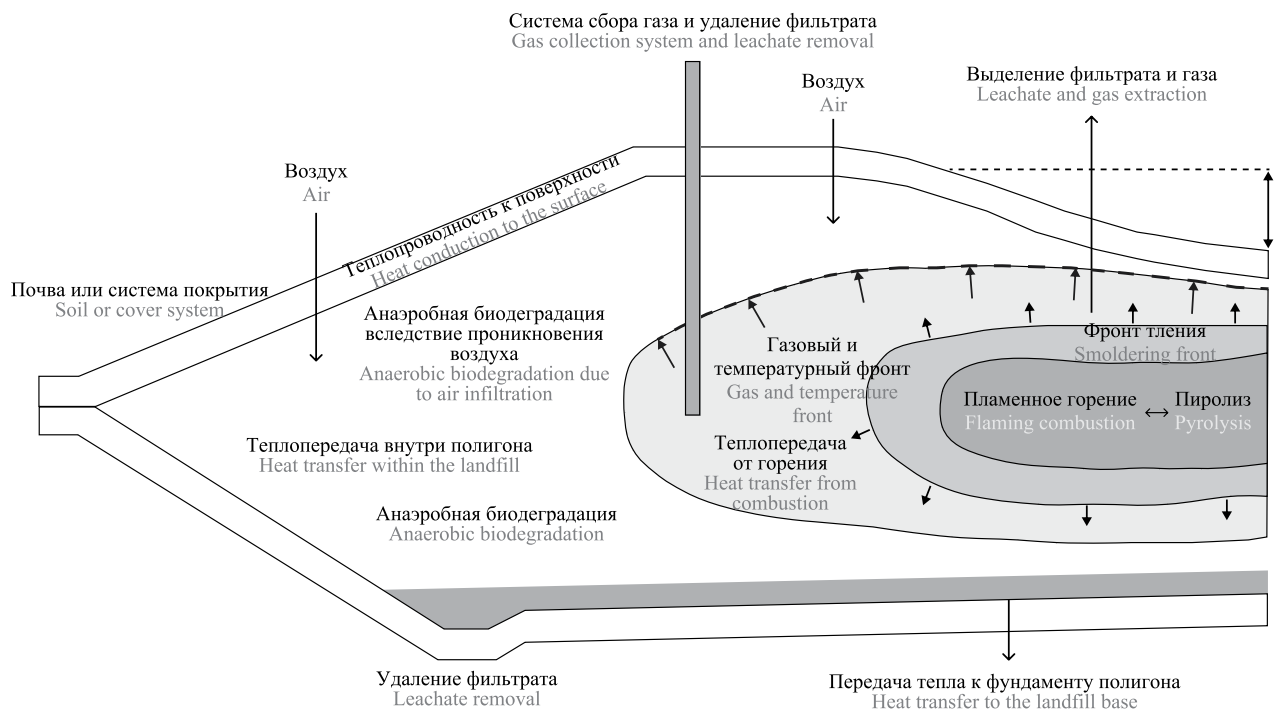


Рис. 2. Схематическое изображение геометрической модели полигона, используемой для генерации данных [24]
Fig. 2. Schematic representation of the geometric polygon model used for data generation [24]

Сбор данных. В связи с отсутствием реальных данных использовали синтетические данные, сгенерированные с помощью симуляции полигона на основе метода конечных элементов, что позволило получить параметры процесса, разрешенные в пространстве и времени. При этом для каждой уникальной комбинации расходов жидкости и газа была выполнена отдельная симуляция длительностью 1300 часов с шагом в 10 часов.

Параметры полигона были сэмплированы во времени с шагом в 10 часов и в пространстве полигона с шагом 1 м для каждой из координат, что позволило получить 900 временных рядов протяженностью 131 точек каждый. Полученные данные экспортированы из среды для симуляции Comsol в нейтральный формат csv и в дальнейшем импортированы в Python в форме Pandas Dataframe.

Для определения регрессоров построена корреляционная матрица (рис. 3), анализ которой показал, что все параметры процесса оказывают ненулевое влияние на температуру и массовые доли газов.

Определено, что объемный расход жидкости оказывает значимое влияние только на температуру. Если положение точки измерения относительно горизонтального расстояния до шахты оказывает существенное влияние на температуру и массовые доли, то вертикальная координата слабо коррелирует с изучаемыми параметрами. Также можно отметить, что массовые доли являются сильно зависимыми величинами. Такое поведение можно объяснить исполь-

зуемой в симуляции кинетической моделью. Данная информация может быть применена для дальнейшего упрощения модели.

Использованный сценарий для генерирования синтетических данных позволяет получить только данные, описывающие идеальное поведение системы с учетом всех упрощений используемой модели. Тем не менее данный подход обеспечивает генерацию практически неограниченного контингента данных, в том числе данных для редких сценариев.

На реальном полигоне может быть установлено несколько датчиков для измерения одного параметра, например температуры. При этом измерение других

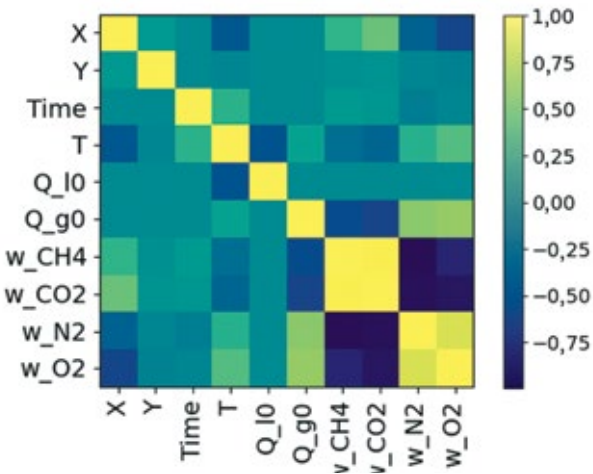


Рис. 3. Корреляционная матрица
Fig. 3. Correlation matrix



Рис. 4. Меры по устранению ошибок

Fig. 4. Error correction measures

параметров, таких как концентрации, может производиться в других точках полигона. В этом случае может быть построена многомерная интерполяционная модель (например, бикубическая) для получения отсутствующих значений в интересующих точках полигона.

Очистка данных. В связи с тем, что данные являются синтетическим, то необходимость в исправлении дефектов отпадает. Тем не менее при поступлении реальных данных с датчиков, установленных в местах размещения и накопления отходов, необходимо принять меры по устранению ошибок (рис. 4).

Маркировка данных. В случае с синтетическими данными целевые значения получены напрямую из симуляции и не требуют дальнейшей подготовки. При работе с реальными данными с полигонов потребуются работа с газоанализаторами. При этом из-за сильной корреляции между массовыми долями компонентов газа можно будет рассмотреть возможность использования софт сенсоров для оценки массовых долей одного, двух или трех газов в зависимости от концентрации остальных. Таким образом можно снизить требования к системе за счет снижения стоимости оборудования.

Конструирование признаков. В качестве входа в модель ожидаются временные ряды всех ключевых параметров, а также отдельных значений координат и расходов жидкости и газа. На выходе ожидаются предсказанные временные ряды для ключевых параметров. На основе требований к модели из общей выборки сформированы отдельные образцы данных размерностью n на 9, где n указывает на длину временного ряда, используемого для предсказаний, а 9 — это общее количество исходных признаков. Для упрощения формирования датасета координаты в каждом образце дублируются для каждой из точки во времени. Объемные расходы жидкости и газа принимаются как значения, которые могут быть изменены. Для каждого исходного образца формируется также вектор целевых значений размерностью m на 5, где m — это горизонт

предсказаний, а 5 указывает на количество признаков для предсказания. Формирование вектора исходных и выходных данных осуществляется методом скользящего, что позволяет гарантировать их соответствие. За счет минимального единичного смещения генерируется максимально возможное количество образцов для обучения модели. Ко всем признакам применена минимакс нормализация для равномерного их масштабирования.

Обучение модели. В связи с тем, что реальные данные с полигонов ожидаются со значительно более сложными зависимостями, чем в синтетических данных, в качестве типа модели выбраны полносвязные нейронные сети прямого распространения, что обусловлено универсальностью и гибкостью модели. В качестве исходных данных могут подаваться как временные ряды [25] (хотя и в качестве отдельных значений), так и глобальные параметры. Это могут быть, например, геометрические параметры полигона или его характеристики, которые оказывают влияние на динамику процесса. В качестве архитектуры испробованы архитектуры от одного до семи слоев с шагом в 2. Каждый промежуточный слой содержит от 4 до 32 нейронов с промежуточными значениями равными степенями двойки. В дальнейшем архитектура модели может быть расширена за счет добавления дополнительных слоев, а модель может быть дообучена или переобучена посредством методов transfer learning. При этом требуемое количество данных для переобучения модели для работы на другом полигоне значительно ниже, чем если обучать модель с нуля.

В качестве решателя взят Adam, целевая функция MSE, размер batch составляет 512 образцов. Обучение производится до 1000 эпох или при отсутствии улучшений значений MSE на тестовой выборке в течение 20 эпох, что наступит раньше. Коэффициент обучения постоянный и равен $1e^{-4}$.

Для определения оптимальных значений гиперпараметров проведено полнофакторное исследо-

Таблица 3. Гиперпараметры и их значения
Table 3. Hyperparameters and their values

Гиперпараметр Hyperparameter	Значения Values
Скорость обучения Learning Rate	$1e^{-4}$
Количество скрытых слоев Number of Hidden Layers	1, 3, 5, 7
Количество нейронов на скрытый слой Number of Neurons per Hidden Layer	4, 8, 16, 32
Длина исходных образцов Length of Input Samples	10, 20, 30, 40
Горизонт предсказаний Prediction Horiz	5, 10, 20, 40

вание зависимости ключевых метрик от значений гиперпараметров (табл. 3).

Переобучение моделей было минимизировано за счет использования метода *early stopping*. Анализ кривых обучения показал, что все эксперименты имеют признаки конвергенции к решению.

Оценка модели. Для оценки модели создана тестовая выборка. Для этого из датасета случайно выбраны 33 % образцов, которые также исключены из обучающей выборки. Для оценки модели использованы метрики MAE и MSE, рассчитанные на тестовой выборке. Результаты показали:

- низкая разность между значениями целевой функции на обучающих и тестовых выборках для всех моделей указывает на отсутствие переобучения;
- длительность временного ряда на входе модели оказывает в целом положительное влияние на качество предсказаний. Тем не менее модели

с длительностью входных временных рядов в 10 точек также входят в десятку лучших моделей;

- увеличение количества скрытых слоев не оказывает положительного влияния. Модели с одним скрытым слоем показывают лучшие результаты;
- с другой стороны, большее количество нейронов на слой приводит к более высокой точности предсказаний;
- все модели представляют хорошие результаты при горизонте предсказаний как 5, так и 10 шагов вперед. При горизонте предсказаний 20 и более точность падает.

Для оценки наличия систематических ошибок распределение остаточных невязок представлено в виде гистограмм (рис. 5). Остаточные невязки лежат в интервале от среднего значения для температуры и около для доли метана.

Также отобразим предсказание для образца с минимальным и максимальным значениями MSE для всех параметров (рис. 6).

В ходе детального анализа модели можно заметить колебания значений, однако их диапазон очень мал.

Приведенная выше модель предсказывает значения ключевых параметров мест размещения и накопления отходов.

Задачу обнаружения и локализации очагов горения с использованием методов машинного обучения можно рассмотреть как задачу обнаружения аномалий (*anomaly detection*) и использовать метод для обнаружения аномалий на основе обучения без учителя [26].

В ходе текущего этапа проекта был опробован инструмент для визуализации аномалий *ruplot*. Для этого были сгенерированы синтетические данные со

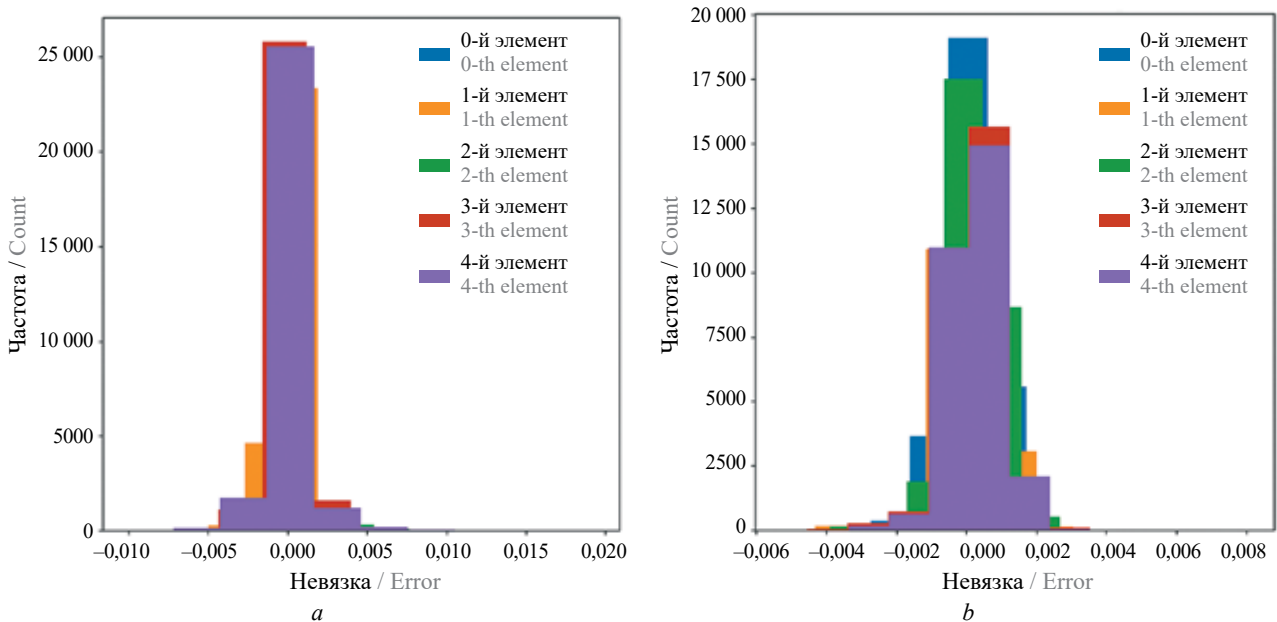


Рис. 5. Распределение остаточных невязок для доли метана (a) и температуры (b)
Fig. 5. Distribution of residual deviations for methane proportion (a) and temperature (b)

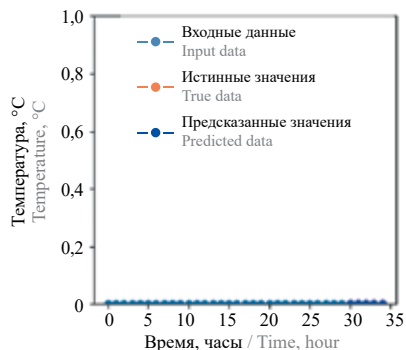
$T, ^\circ\text{C}$ / Температура, $^\circ\text{C}$ / Temperature, $^\circ\text{C}$

$x = 1,000; y = 0,500; z = 0,00$

QJO / Объемный расход жидкости = 1,0000 / Volume flow rate of liquid = 1,0000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0000 / Volumetric gas flow = 0,0000

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $1,4\text{e-}04$ / Mean square error = $1,4\text{e-}04$



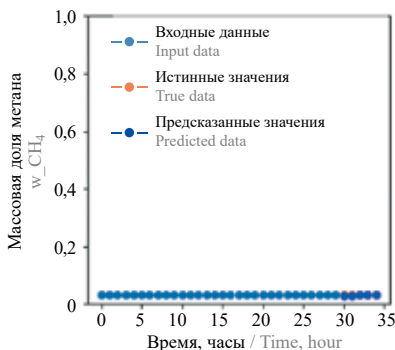
Массовая доля метана / w_{CH_4}

$x = 1,000; y = 0,500; z = 0,00$

QJO / Объемный расход жидкости = 1,0000 / Volume flow rate of liquid = 1,0000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0000 / Volumetric gas flow = 0,0000

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $1,4\text{e-}04$ / Mean square error = $1,4\text{e-}04$



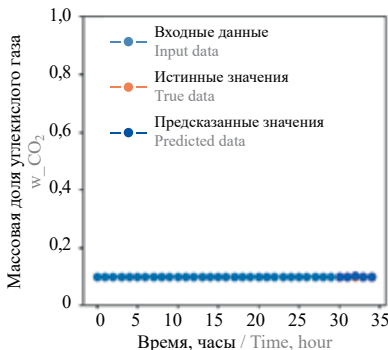
Массовая доля углекислого газа / w_{CO_2}

$x = 1,000; y = 0,500; z = 0,00$

QJO / Объемный расход жидкости = 1,0000 / Volume flow rate of liquid = 1,0000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0000 / Volumetric gas flow = 0,0000

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $1,4\text{e-}04$ / Mean square error = $1,4\text{e-}04$



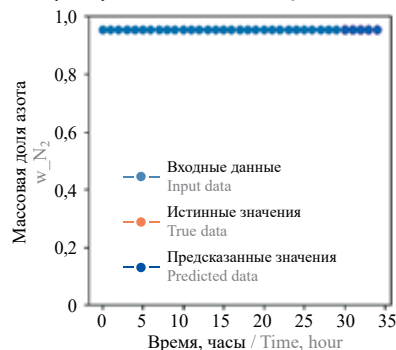
Массовая доля азота / w_{N_2}

$x = 1,000; y = 0,500; z = 0,00$

QJO / Объемный расход жидкости = 1,0000 / Volume flow rate of liquid = 1,0000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0000 / Volumetric gas flow = 0,0000

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $1,4\text{e-}04$ / Mean square error = $1,4\text{e-}04$



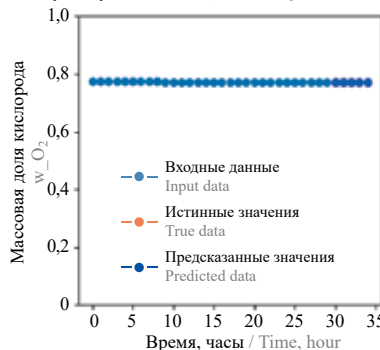
Массовая доля кислорода / w_{O_2}

$x = 1,000; y = 0,500; z = 0,00$

QJO / Объемный расход жидкости = 1,0000 / Volume flow rate of liquid = 1,0000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0000 / Volumetric gas flow = 0,0000

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $1,4\text{e-}04$ / Mean square error = $1,4\text{e-}04$



a

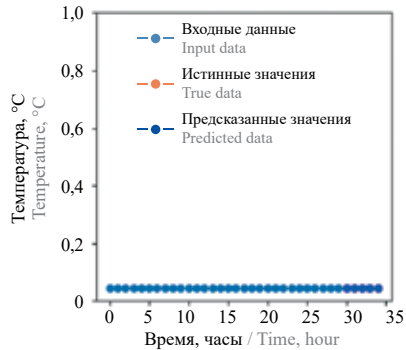
$T, ^\circ\text{C}$ / Температура, $^\circ\text{C}$ / Temperature, $^\circ\text{C}$

$x = 0,600; y = 750; z = 0,80$

QJO / Объемный расход жидкости = 0,4000 / Volume flow rate of liquid = 0,4000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0451 / Volumetric gas flow = 0,0451

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $5,0\text{e-}04$ / Mean square error = $5,0\text{e-}04$



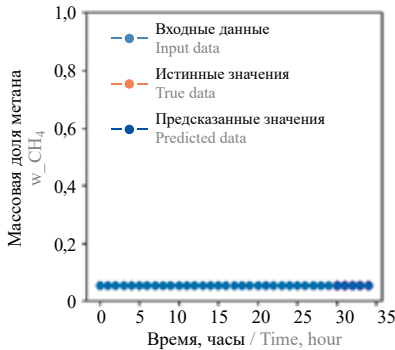
Массовая доля метана / w_{CH_4}

$x = 0,600; y = 750; z = 0,80$

QJO / Объемный расход жидкости = 0,4000 / Volume flow rate of liquid = 0,4000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0451 / Volumetric gas flow = 0,0451

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $5,0\text{e-}04$ / Mean square error = $5,0\text{e-}04$



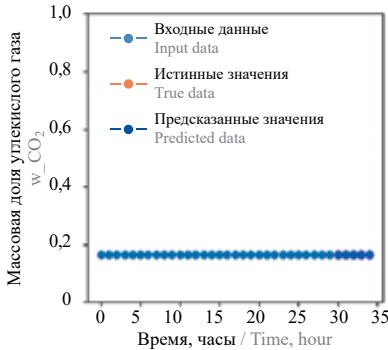
Массовая доля углекислого газа / w_{CO_2}

$x = 0,600; y = 750; z = 0,80$

QJO / Объемный расход жидкости = 0,4000 / Volume flow rate of liquid = 0,4000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0451 / Volumetric gas flow = 0,0451

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $5,0\text{e-}04$ / Mean square error = $5,0\text{e-}04$



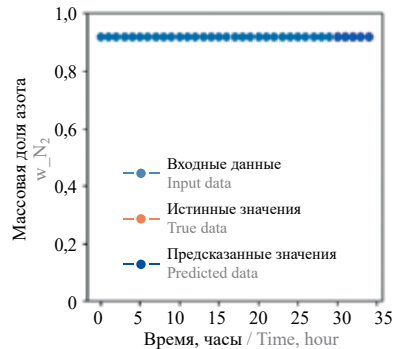
Массовая доля азота / w_{N_2}

$x = 0,600; y = 750; z = 0,80$

QJO / Объемный расход жидкости = 0,4000 / Volume flow rate of liquid = 0,4000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0451 / Volumetric gas flow = 0,0451

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $5,0\text{e-}04$ / Mean square error = $5,0\text{e-}04$



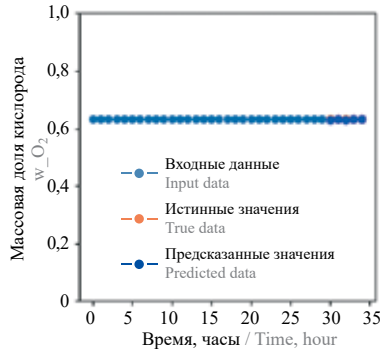
Массовая доля кислорода / w_{O_2}

$x = 0,600; y = 750; z = 0,80$

QJO / Объемный расход жидкости = 0,4000 / Volume flow rate of liquid = 0,4000

Q_gO / Объемный расход газа = 0,0451 / Volumetric gas flow = 0,0451

MSE / Среднеквадратичная ошибка = $5,0\text{e-}04$ / Mean square error = $5,0\text{e-}04$



b

Рис. 6. Выбранные тестовые ряды с минимальным (a) и максимальным (b) значениями метрики MSE

Fig. 6. Selected test series with minimum (a) and maximum (b) MSE metric values

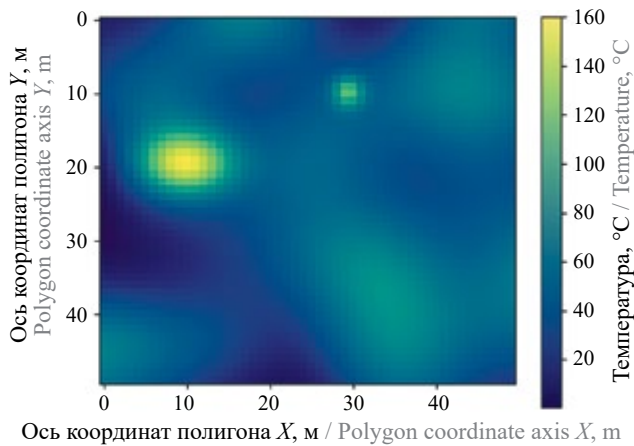


Рис. 7. Пример интерполированных данных
Fig. 7. Example of interpolated data

случайной простановкой аномалий. На рис. 7 представлено одно сечение трехмерного поля температур.

Данные считываются из базы данных и пропускаются через детектор аномалий. Детектор указывает на позицию аномалий. Результаты работы прототипа приведены на рис. 8. Визуализация представляет собой трехмерное поле температур полигона. Оранжево-желтые области обозначают регионы с аномально высокой температурой, которые локализуются детектором аномалий. Координаты аномалий отображаются в виде точек в визуализации, а также в виде таблицы под графиком.

Интеграция визуализаций, созданных с помощью инструмента ruyplot, осуществляется с помощью open-source инструмента dash. Dash создает flask webserver, который содержит созданную визуализацию и может быть встроен в веб-приложение или веб-страницу в качестве iframe.

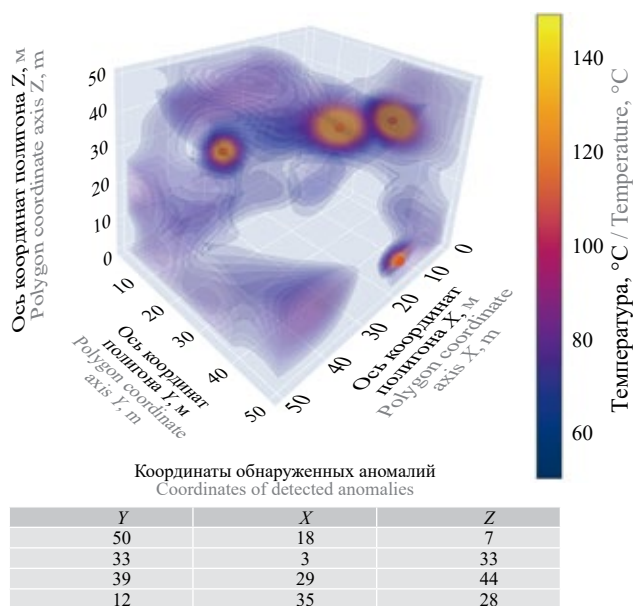


Рис. 8. Результат работы прототипа по обнаружению аномалий
Fig. 8. The result of the prototype's anomaly detection performance

2. Создание модели, позволяющей на основе полученных с датчиков данных обнаруживать очаги горения, в том числе скрытые, с указанием их местоположения и границ

Сценарии использования и архитектурное решение. Использование сервиса «Умный полигон» предусматривает три основных сценария использования, которые определяют архитектуру сервиса.

В рамках первого сценария происходит только сбор данных с датчиков, установленных в местах размещения и накопления ТКО. Датчики влажности и температуры, газоанализаторы снабжены нативным функционалом для записи данных в буфер и их периодической отправки в централизованную базу данных, развернутую в облаке. Рассматриваемое решение обеспечивает отказоустойчивость и децентрализацию всей системы. Например, в случае возникновения ошибки при сборе или передаче данных с одного датчика остальные продолжают работать без перебоев.

Реализация второго сценария заключается в предоставлении клиенту API сервиса для выполнения предсказаний по ключевым параметрам и оценке класса пожарной опасности мест размещения и накопления ТКО. Доступ API осуществляется посредством GET запросов, при которых клиент отправляет последние значения со своих датчиков. В качестве ответа формируются предсказания от сервиса. В теле запроса помимо данных клиент также указывает дополнительные параметры, такие как API ключ для идентификации клиента и идентификатор модели. Использование последнего позволяет не только обеспечивать версионирование моделей для клиентов, но и доступ к моделям, которые были обучены специально для выбранного полигона. Предоставление API на основе распространенного RestAPI интерфейса позволяет интегрировать сервис с клиентскими приложениями вне зависимости от системы и языка программирования.

Третий сценарий использования сервиса позволяет еще значительно сделать сервис более доступным для пользователей. При этом предоставляется веб-приложение для визуализации исторических данных, данных реального времени (периодическое обновление данных из базы данных для необработанных данных), а также предсказанных ключевых параметров и оценки класса пожарной опасности. Это позволяет клиенту получить доступ к основному функционалу сервиса прямо «из коробки».

Техническая сторона сервиса реализована на облачной бессерверной архитектуре, использование которой позволяет повысить отказоустойчивость, обеспечить высокий уровень масштабирования и удобство для пользователей, так как API и веб-приложение доступны напрямую через сеть интер-

нет. Для сбора необработанных данных используется нереляционная база данных для временных рядов InfluxDB, которая обеспечивает высокую плотность запросов по загрузке данных. Загрузка данных может осуществляться за счет RestAPI, а выгрузка данных для обучения моделей — за счет нативной интеграции в Python. Деплоймент сервера InfluxDB выполняется через docker контейнер с файловым хранилищем для данных, вынесенным через volume в хранилище объектов s3.

Работа RestAPI обеспечивается за счет сервиса API Gateway совместно с Cloud Functions, которые при получении API запросов выполняют их обработку.

Веб-приложение для визуализации данных использует сервис Data Lens, который берет данные напрямую из InfluxDB для выбранного полигона, а также периодически отправляет запросы API для получения предсказаний и оценок пожарной опасности в режиме псевдореального времени.

Обработка данных и обучение моделей происходит в офлайн режиме. Для этого ML аналитик делает запрос к базе данных с необработанными данными и, используя конвенциональные библиотеки Python, экспериментирует с обучением и оптимизацией моделей. Запущенный через docker mlflow, с вынесенным хранилищем данных в хранилище s3, осуществляет сохранение параметров и метрик моделей, а также артефактов, включая обученные модели. Это позволяет сравнивать модели между собой. После экспериментирования выбирается самый удачный кандидат и через уникальный идентификатор в mlflow модель интегрируется с обработчиком запросов. При этом новая модель становится доступна клиентам сервиса.

Архитектура сервиса схематично представлена на рис. 9.

Использование сервиса «Умный полигон» позволяет визуализировать информацию о состоянии мест размещения и накопления отходов и результатах прогнозирования; сформировать отчет по полигону за выбранный период; осуществлять своевременное оповещение и передачу необходимой информации о возможности или возникновении горения; выбирать наилучшие решения, направленные на минимизацию пожарного риска, и проводить контроль их эффективности.

3. Проведение тестирования разработанных моделей

Точность наилучших моделей лежит в диапазоне между 0,03 и 0,06 % относительной погрешности. Незначительное различие значений train_loss и test_loss для обученных моделей указывает на минимальное переобучение.

В ходе тестирования было установлено, что значения, возвращаемые через разработанные компо-

ненты с RestAPI интерфейсом, соответствуют как результатам, полученным при прямом использовании модели, так и тестовым значениям в пределах допустимой погрешности. Полученные результаты подтверждают работоспособность компонента. Средняя продолжительность обработки одного запроса, включая первоначальное форматирование данных в формате JSON, составляет около 5 миллисекунд при запуске на локальной системе.

В местах депонирования отходов возникает значительное количество пожаров, которые трудно поддаются тушению и практически не прогнозируются. Представленная работа является продолжением исследований [1, 6–9, 11, 12, 14, 17], направлена на создание прогнозных моделей и повышение точности предсказания возникновения пожароопасных ситуаций в местах накопления и размещения отходов. Проведенный анализ существующих систем видеомониторинга, компьютерного зрения, датчиков, применяемых в местах накопления и размещения ТКО, показал, что удовлетворительного решения вопросов, связанных с прогнозированием и предупреждением пожаров на таких объектах, пока не найдено.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами S. Samain [10], S. Moqbel [9] о необходимости разработки системы показателей, определяющих пожарную опасность мест накопления и размещения отходов. Наиболее значимыми показателями являются температура, концентрации газов в устье скважины, расходы газа и жидкости. Выбор метода прогнозирования подтвержден результатами, полученными H.A. Qdaisa, N. Shatnaw [15], обосновывающими перспективность использования искусственных нейронных сетей и машинного обучения.

В связи с отсутствием реальных данных с полигонов применяли синтетические данные, сгенерированные с помощью симуляции полигона на основе метода конечных элементов, подробно описанного D. Hanson, N. Yeşiller и др. [8].

Преодоление проблем, относящихся к практической реализации результатов исследований непосредственно в местах размещения и накопления отходов и не решенных в работах S. Copping et al. [7], D. Hanson et al. [8], S. Samain [10], A. Titov et al. [12], A. Musilli [18], G.S. Manjunath et al. [20], R. Mohsen [22], авторы связывают с обеспечением возможности не только обнаруживать очаги горения, определять их местоположение и границы, но и прогнозировать пожароопасные ситуации, что позволит принимать заблаговременные меры, направленные на снижение пожарного риска.

Результаты проведенного исследования войдут в качестве первого модуля «Мониторинг и прогнозирование пожароопасных состояний мест размещения и накопления ТКО» в состав комплексной

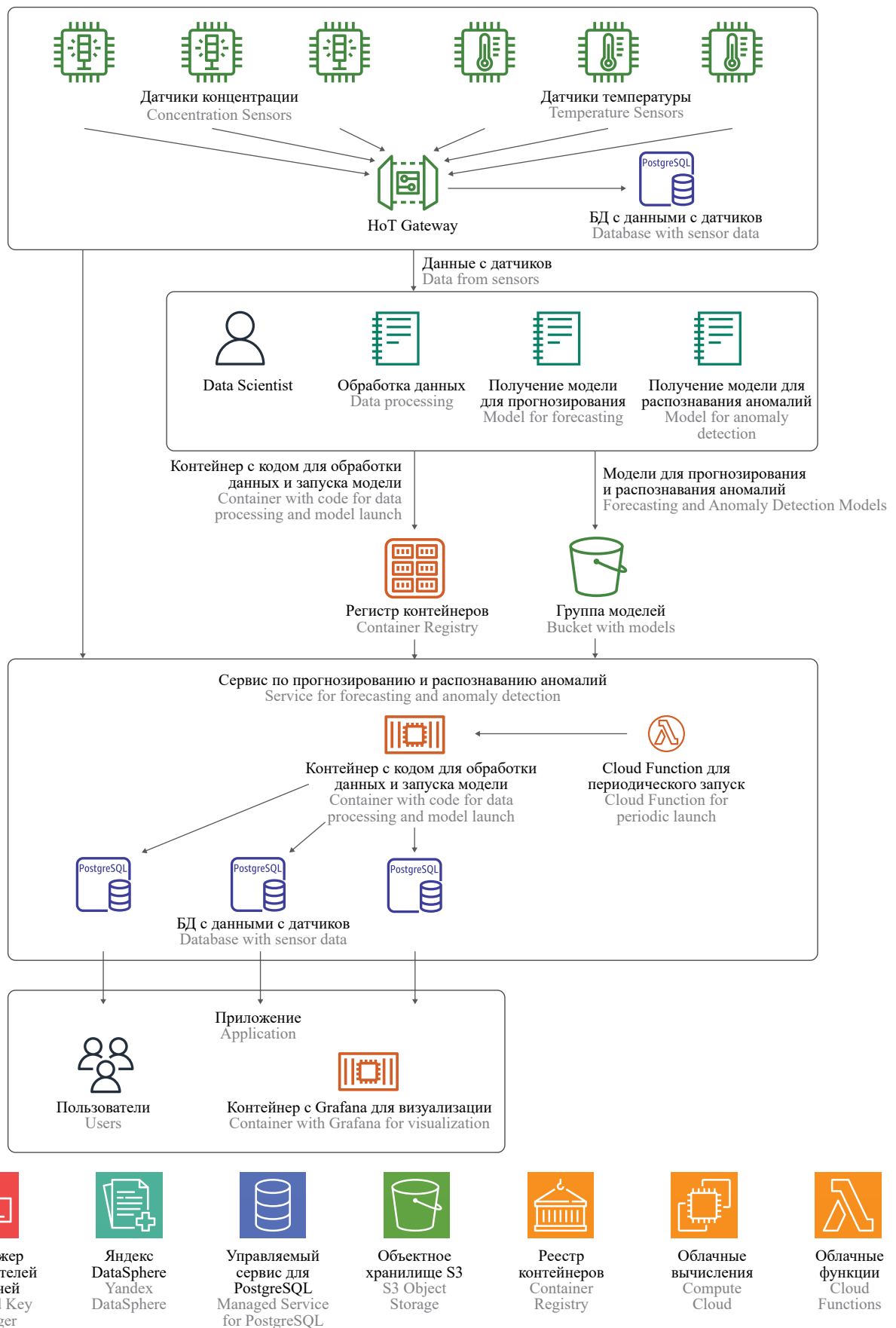


Рис. 9. Архитектура сервиса «Умный полигон»
Fig. 9. Architecture of the “Smart Polygon” service

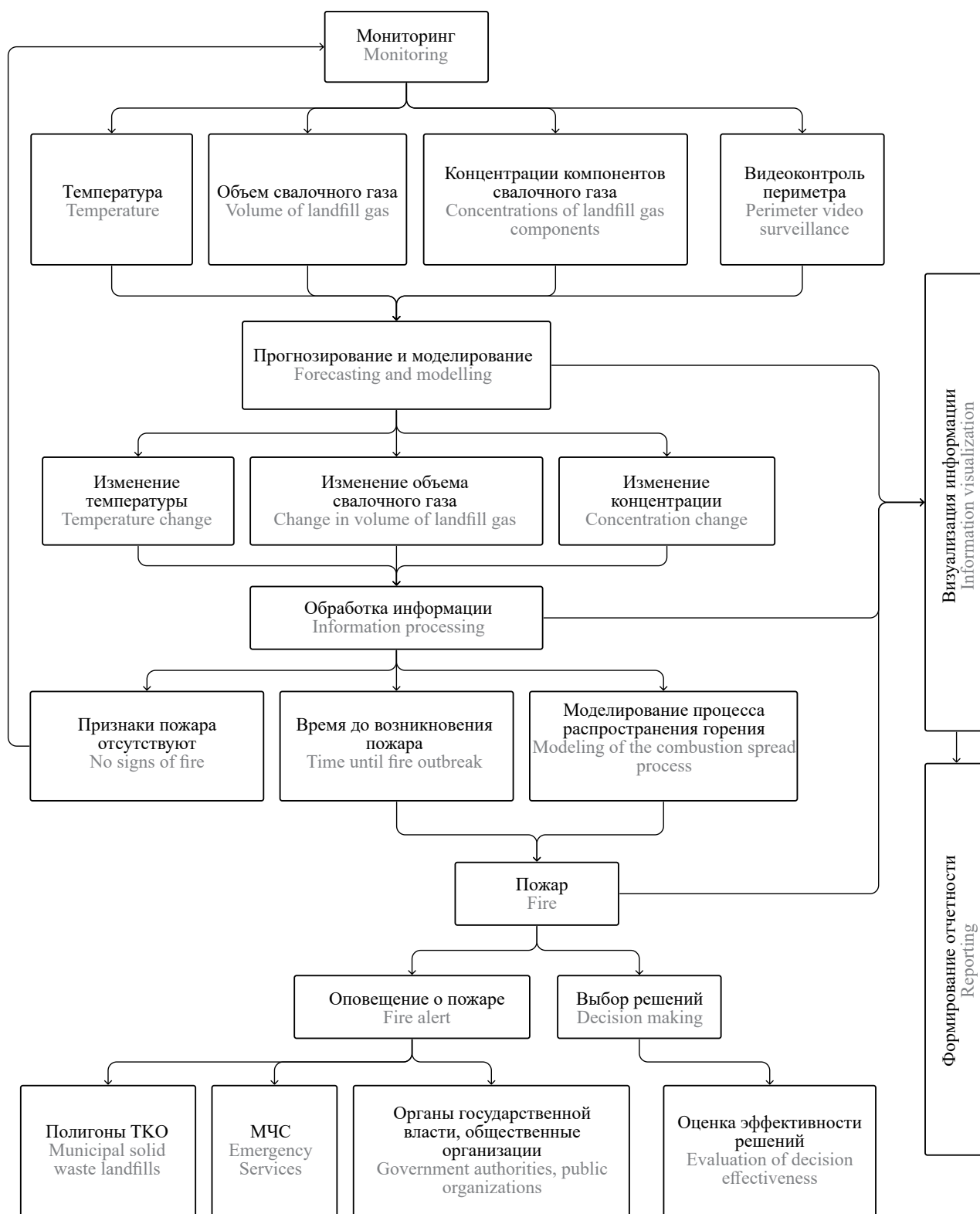


Рис. 10. Структура комплексной платформы [14]

Fig. 10. Structure of the integrated platform [14]

платформы, предназначенной для риск-ориентированного прогнозирования, снижения экологической и пожарной опасности мест размещения и накопления отходов на основе методов искусственного интеллекта с использованием облачных

технологий. Структура платформы представлена на рис. 10.

Второй модуль «Система поддержки принятия решений» планируется как компьютерная автоматизированная система, включающая пользователь-

ский интерфейс и программные интеллектуальные средства для поддержки принятия решений, направленных на предупреждение и тушение пожаров.

Выводы

1. Проведенный сравнительный анализ систем мониторинга мест размещения и накопления ТКО показал нерешенность вопросов прогнозирования возникновения и развития пожара, поддержки принятия решений. Возможность подключения к системе группы полигонов в большинстве случаев не предусмотрена, отсутствует функция визуализации полученной информации.

2. Разработана система показателей для оценки пожароопасных состояний мест размещения и накопления отходов, включающая температуру, массовые доли метана, углекислого газа, азота и кислорода, расходы газа и жидкости.

3. Создана модель, позволяющая на основе полученных с датчиков данных прогнозировать динамику изменения ключевых параметров и давать оценку пожарной опасности мест размещения и накопления отходов с учетом выбранного горизонта планирования. В связи с тем, что реальные данные с полигонов ожидаются со значительно более сложными зависимостями, чем в синтетических данных, в качестве типа модели выбраны полносвязные нейронные сети

прямого распространения. Проведена оценка модели на основе тестовой выборки, обоснован метод для обнаружения аномалий на основе обучения без учителя.

4. Разработана модель, позволяющая на основе полученных с датчиков данных обнаруживать очаги горения, в том числе скрытые, с указанием их местоположения и границ.

Определены и представлены характеристики основных сценариев, определяющих структуру и использование сервиса «Умный полигон». Разработана его архитектура. Применение сервиса «Умный полигон» позволяет визуализировать информацию о состоянии мест захоронения отходов и результатах прогнозирования; сформировать отчет по полигону за выбранный период; осуществлять своевременное оповещение и передачу необходимой информации о возможности или возникновении горения; выбирать наилучшие решения, направленные на минимизацию пожарного риска, и проводить контроль их эффективности.

5. Проведено тестирование разработанных моделей.

Результаты проведенного исследования войдут в качестве модуля в состав комплексной платформы для риск-ориентированного прогнозирования, снижения экологической и пожарной опасности мест размещения и накопления ТКО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Королева Л.А., Свидзинская Г.Б., Хайдаров А.Г., Ивахнюк Г.К. Применение модели Хольта – Уинтерса и эксергетического метода для прогнозирования безопасного обращения с отходами в Российской Федерации // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 11. С. 34–40. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-34-40
2. Kumar A., Agrawal A. Recent trends in solid waste management status, challenges, and potential for the future Indian cities : a review // Current Research in Environmental Sustainability. 2020. Vol. 2. P. 10001. DOI: 10.1016/j.crsust.2020.100011
3. Liao C.-H., Chiu A. SF Evaluate municipal solid waste management problems using hierarchical framework // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2011. Vol. 25. Pp. 353–362. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.10.554
4. Анализ выполнения мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность Российской Федерации, в части ликвидации объектов накопленного вреда и формирования комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами : отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия // Бюллетень Счетной палаты РФ. 2020. № 9 (274). С. 6–43.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году : информ.-аналит. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с.
6. Jafari N.A., Stark T.D., Thalhamer T. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills // Waste Management. 2016. Vol. 59. Pp. 286–301. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.052
7. Hanson D., Yeşiller N., Onnen M.T. et al. Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills // Waste Management and Research. 2013. Vol. 33 (10). Pp. 1993–2000. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.04.003
8. Samain S. Development of a subsurface landfill fire risk-index // Masters in Science. Rowan University, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.24248.37123
9. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. Вачнадзе Р.Г. М. : Радио и связь, 1991.

10. Titov A., Tumanov A., Timofeev A., Tumanov V., Denisov V. Autonomous safety system for MSW landfills // E3S Web International Conference on Efficient Production and Processing. 2020. Vol. 161. P. 01043. DOI: 10.1051/conf/202016101043
11. Daugela I., Visockiene J.S., Kumpiene J. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors // *Detritus*. 2020. Vol. 10. Pp. 127–138. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13942
12. Хайдаров А.Г., Королева Л.А., Смирнов А.С. Прогнозирование возникновения и распространения подземных пожаров на полигонах твердых коммунальных отходов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2022. № 4. С. 41–50.
13. Qdais H.A., Shatnaw N. Assessing and predicting landfill surface temperature using remote sensing and an artificial neural network // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40. Issue 24. Pp. 9556–9571. DOI: 10.1080/01431161.2019.1633703
14. Amershi S., Begel A., Bird Ch., Deline R. Software engineering for machine learning : a case study // *IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE 2019)*. Montreal, QC, Canada, 2019. Pp. 291–300. DOI: 10.1109/ICSE-SEIP.2019.00042
15. Martin J.W., Stark T.D., Thalhamer T., Gerbasi-Graf G.T., Gortner R.E. Detection of aluminum waste reactions and associated waste fires // *Journal of Hazardous, Toxic & Radioactive Waste*. 2013. Vol. 17 (3). Pp. 164–174. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000171
16. Musilli A. Landfill elevated internal temperature detection and landfill fire index assessment for fire monitoring : theses and dissertations. USA : Rowan University, 2016. URL: <https://rdw.rowan.edu/etd/2340/>
17. Koroleva L.A., Antoshina T.N., Boyakhchyan A.A., Haidarov A.G., Ivakhnuk G.K. Comparative analysis of methods for determining the flammability of municipal solid waste as railway transport cargo // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 938 (1). P. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/938/1/012006
18. Manjunatha G.S., Chavan D., Lakshmikanthan P., Singh L., Kumar S., Kumar R. Specific heat and thermal conductivity of municipal solid waste and its effect on landfill fires // *Waste Management*. 2020. Vol. 116. Pp. 120–130. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.033
19. Millet I., Saaty T. On the relativity of relative measures-accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP // *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 121 (1). Pp. 202–212. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.033
20. Mohsen R. Estimation of greenhouse gas emissions in municipal solid waste landfills in ontario using mathematical models and direct measurements : dissertation. Canada : University of Guelph, 2019.
21. Zaeimi M.B., Rassafi A.A. Designing an integrated municipal solid waste management system using a fuzzy chance-constrained programming model considering economic and environmental aspects under uncertainty // *Waste Management*. 2021. Vol. 125. Pp. 268–279. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.047
22. Королева Л.А., Подмарков В.В., Хайдаров А.Г. Система классификации зон полигонов твердых коммунальных отходов по пожарной опасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 31–39.
23. Lim B., Zohren S. Time-series forecasting with deep learning: a survey // *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2021. Vol. 379. No. 2194. P. 20200209. DOI: 10.1098/rsta.2020.0209
24. Nassif A.B., Talib M.A., Nasir Q., Dakalbab F.M. Machine Learning for Anomaly Detection : a systematic review // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 78658–78700. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083060

REFERENCES

1. Koroleva L.A., Svidzinskaya G.B., Khaydarov A.G., Ivakhnyuk G.K. Application of the Holt – Winters model and the exergetic method for predicting safe waste management in the Russian Federation. *Occupational safety in industry*. 2021; 11:34-40. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-34-40 (rus).
2. Kumar A., Agrawal A. Recent trends in solid waste management status, challenges, and potential for the future Indian cities : a review. *Current Research in Environmental Sustainability*. 2020; 2:10001. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-34-40
3. Liao C.-H., Chiu A. SF Evaluate municipal solid waste management problems using hierarchical framework. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2011; 25:353-362. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.10.554
4. ACRF Analysis of the implementation of measures ensuring the environmental safety of the Russian Federation in terms of the elimination of accumulated damage objects and the formation of a comprehensive system for solid municipal waste management: report on the results of an expert-analytical event. *Bulletin of the Accounting Chamber of the Russian Federation*. 2020; 9(274):6-43. (rus).

5. *Fires and fire safety in 2022 : inform.-analyte. col.* Balashikha, Federal State Budgetary Institution VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. (rus).
6. Jafari N.A., Stark T.D., Thalhamer T. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills. *Waste Management*. 2016; 59:286-301. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.052
7. Hanson D., Yeşiller N., Onnen M.T. et al. Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills. *Waste Management and Research*. 2013; 33(10):1993-2000.
8. Samain S. Development of a subsurface landfill fire risk-index. *Masters in Science*. USA Rowan University, 2018.
9. Saati T., Kerns K. *Analytical planning. Organization of systems* / trans. from English. Vachnadze R.G. Moscow, Radio and Communications, 1991. (rus).
10. Titov A., Tumanov A., Timofeev A., Tumanov V., Denisov V. Autonomous safety system for MSW landfills. *E3S Web of Conferences*. 2020; 161:01043. DOI: 10.1051/conf/202016101043
11. Daugela I., Visockiene J.S., Kumpiene J. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and a semiconductor sensors. *Detritus*. 2020; 10:127-138. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13942
12. Khaydarov A.G., Koroleva L.A., Smirnov A.S. Forecasting the occurrence and spread of underground fires at landfills of solid municipal waste. *Scientific and analytical journal "Vestnik Saint Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia"*. 2022; 4:41-50. DOI: 10.1051/conf/202016101043 (rus).
13. Qdaisa H.A., Shatnaw N. Assessing and predicting landfill surface temperature using remote sensing and an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*. 2019; 40(24):9556-9571. DOI: 10.1080/01431161.2019.1633703
14. Amershi S., Begel A., Bird Ch., Deline R. Software Engineering for Machine Learning : a Case Study. *IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE 2019)*. Montreal, QC, Canada, 2019; 291-300. DOI: 10.1109/ICSE-SEIP.2019.00042
15. Martin J.W., Stark T.D., Thalhamer T., Gerbasi-Graf G.T., Gortner R.E. Detection of aluminum waste reactions and associated waste fires. *Journal of Hazardous, Toxic & Radioactive Waste*. 2013; 17(3):164-174. DOI :10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000171
16. Musilli A. *Landfill elevated internal temperature detection and landfill fire index assessment for fire monitoring : theses and dissertations*. USA, Rowan University, 2016. URL: <https://rdw.rowan.edu/etd/2340/>
17. Koroleva L.A., Antoshina T.N., Boyakhchyan A.A., Haidarov A.G., Ivakhnuk G.K. Comparative analysis of methods for determining the flammability of municipal solid waste as railway transport cargo. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 938(1):012006. DOI: 10.1088/1755-1315/938/1/012006
18. Manjunatha G.S., Chavan D., Lakshmikanthan P., Singh L., Kumar S., Kumar R. Specific heat and thermal conductivity of municipal solid waste and its effect on landfill fires. *Waste Management*. 2020; 116:120-130. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.033
19. Millet I., Saaty T. On the relativity of relative measures-accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP. *European Journal of Operational Research*. 2000; 121(1):202-212. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.033
20. Mohsen R. *Estimation of Greenhouse Gas Emissions in Municipal Solid Waste Landfills in Ontario Using Mathematical Models and Direct Measurements : dissertation*. Canada, University of Guelph, 2019.
21. Zaeimi M.B., Rassafi A.A. Designing an integrated municipal solid waste management system using a fuzzy chance-constrained programming model considering economic and environmental aspects under uncertainty. *Waste Management*. 2021; 125:268-279. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.047
22. Koroleva L.A., Podmarkov V.V., Khaydarov A.G. Classification system of solid municipal waste landfill zones by fire hazard. *Problems of risk management in the technosphere*. 2022; 4(64):31-39. (rus).
23. Lim B., Zohren S. Time-series forecasting with deep learning : a survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2021; 379(2194):20200209. DOI: 10.1098/rsta.2020.0209
24. Nassif A.B., Talib M.A., Nasir Q., Dakalbab F.M. Machine Learning for Anomaly Detection : a systematic review. *IEEE Access*. 2021; 9:78658-78700. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083060

Поступила 01.03.2024, после доработки 25.03.2024;

принята к публикации 10.04.2024

Received March 1, 2024; Received in revised form March 25, 2024;

Accepted April 10, 2024

Информация об авторах

КОРОЛЕВА Людмила Анатольевна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной

Information about the authors

Lyudmila A. KOROLEVA, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Fire, Rescue Equipment and Automotive Industry Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and

службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; Scopus AuthorID: 57395471000; ResearcherID: HJZ-4255-2023; ORCID: 0000-0001-5661-5774; e-mail: lyudamil@mail.ru

ХАЙДАРОВ Андрей Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, генеральный директор, ООО «Аналитические системы», Россия, 191036, г. Санкт-Петербург, 3-я Советская ул., 7, пом. 5н; Scopus AuthorID: 57395680500; ResearcherID: ACX-2398-2022; ORCID: 0000-0003-0693-8027; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com

Вклад авторов:

Королева Л.А. — *сбор материала; проведение сравнительного анализа систем мониторинга; обоснование системы показателей для оценки пожарной опасности; подготовка данных для разработки и тестирования моделей; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.*

Хайдаров А.Г. — *сбор материала; проведение сравнительного анализа систем мониторинга; обоснование системы показателей для оценки пожарной опасности; разработка моделей; их тестирование; разработка архитектуры сервиса; оформление графического материала; научное редактирование текста.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Elimination on Consequences of Natural Disasters named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; Leading Researcher at the Laboratory of Environmental Problems of Transport Systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12th Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57395471000; ResearcherID: HJZ-4255-2023; ORCID: 0000-0001-5661-5774; e-mail: lyudamil@mail.ru

Andrey G. KHAYDAROV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, General Director, Limited Liability Company “Analytical Systems”, 3-ya Sovetskaya St., 7, room 5n, Saint-Petersburg, 191036, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57395680500; ResearcherID: ACX-2398-2022; ORCID: 0000-0003-0693-8027; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com

Contribution of the authors:

Koroleva L.A. — *collecting material; conducting a comparative analysis of monitoring systems; substantiating a system of indicators for assessing fire danger; preparing data for models development and testing; processing material; writing an article; scientific text editing.*

Khaydarov A.G. — *collecting material; conducting a comparative analysis of monitoring systems; substantiating a system of indicators for assessing fire danger; developing models; testing them; developing a service architecture; designing graphic material; scientific text editing.*

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 4. С. 69–83
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(4):69-83

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW AND ANALYTICAL ARTICLE

УДК 614.89

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.04.69-83>

Перспективы развития дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде

Виталий Вячеславович Крымский¹✉, Андрей Борисович Бойцов², Евгений Игоревич Дашкевич¹, Роман Александрович Юрченко¹, Владислав Романович Головенко¹

¹ 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, г. Санкт-Петербург, Россия

² Федеральная противопожарная служба Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрены тактико-технические характеристики различных дыхательных аппаратов, стоящих на вооружении газодымозащитной службы в подразделениях пожарной охраны Российской Федерации — дыхательных аппаратов на сжатом воздухе, дыхательных аппаратов на сжатом кислороде, а также обоснована необходимость развития отечественных дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде. Актуальностью данной статьи является отсутствие современных отечественных дыхательных аппаратов с длительным периодом защитного действия для эффективного тушения пожаров.

Целью настоящей статьи является усовершенствование оснащения газодымозащитной службы подразделений пожарной охраны наиболее эффективными и подходящими для работы дыхательными аппаратами при тушении пожаров на станциях метрополитена, портовых верфях и судах, подземных паркингах и зданиях повышенной этажности.

Материалы и методы. Используется аналитический подход к рассмотрению средств индивидуальной защиты органов дыхания, которые стоят на вооружении во всех видах пожарной охраны нашей страны, подробно разобраны характеристики различных видов дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде и проведен их сравнительный анализ.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования были даны рекомендации по улучшению оснащения дыхательными аппаратами подразделений пожарной охраны. Авторами даны рекомендации по внесению некоторых изменений в нормативно-правовые акты Российской Федерации.

Выводы. В результате исследования был получен обоснованный вывод об эффективности и необходимости внедрения дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде и доукомплектования ими газодымозащитной службы пожарно-спасательных подразделений. Также в условиях отсутствия дыхательных аппаратов данного типа в данный момент авторами статьи были представлены предложения, которые необходимо взять за основу при производстве совершенно новых дыхательных аппаратов и комплектов лицевых частей с адаптерами для крепления к пожарному шлему, а также даны предложения по внесению изменений в нормативно-правовые документы Российской Федерации и необходимая для их обозначения аббревиатура.

Ключевые слова: тушение пожаров; пожарная охрана; кислородно-изолирующий противогаз; газодымозащитная служба; ликвидация чрезвычайной ситуации

Для цитирования: Крымский В.В., Бойцов А.Б., Дашкевич Е.И., Юрченко Р.А., Головенко В.Р. Перспективы развития дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 69–83. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.69-83

✉ Крымский Виталий Вячеславович, e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Prospects for the development of breathing apparatus using chemically bound oxygen

Vitaliy V. Krymskiy¹✉, Andrey B. Boytsov², Evgeniy I. Dashkevich¹, Roman A. Yurchenko¹, Vladislav R. Golovenko¹

¹ 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, Saint Petersburg, Russian Federation

² Federal Fire Fighting Service of the State Fire Fighting Service of the Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters in Saint Petersburg, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper examines the tactical and technical characteristics of various breathing apparatuses in service with the gas and smoke protection service in the fire protection units of the Russian Federation — compressed air breathing apparatus, compressed oxygen breathing apparatus, and also substantiates the need for the development of domestic breathing apparatuses on chemically bound oxygen. The relevance of this paper is the lack of modern domestic breathing apparatus with a long period of protective action for effective fire extinguishing.

Aims and Objectives. The aim of this paper is to improve the equipment of the gas and smoke protection service of fire protection units with the most effective and suitable breathing apparatus for extinguishing fires at metro stations, harbour yards and ships, underground car parks and high-rise buildings.

Materials and methods. An analytical approach is used to consider personal respiratory protection equipment, which are in service in all types of fire protection in our country, the characteristics of various types of chemically bonded oxygen breathing apparatus are analyzed in detail and their comparative analysis is carried out.

Results and their discussion. As a result of the study, recommendations were made to improve the equipment of fire departments with breathing apparatus. The authors gave recommendations for some changes in the regulatory legal acts of the Russian Federation.

Conclusions. A reasonable conclusion was obtained about the effectiveness and necessity of introducing breathing apparatus based on chemically bound oxygen and supplementing them with gas and smoke protection service of fire and rescue units. Also, in the absence of breathing apparatus of this type at the moment, the authors of the paper presented proposals that should be taken as a basis for the production of completely new breathing apparatus and sets of front parts with adapters for attachment to a fire helmet, as well as proposals for amendments to the regulatory legal documents of the Russian Federation and the necessary abbreviation for their designation are given.

Keywords: fire extinguishing; fire protection; oxygen-insulating gas mask; smoke protection service; emergency response

For citation: Krymskiy V.V., Boytsov A.B., Dashkevich E.I., Yurchenko R.A., Golovenko V.R. Prospects for the development of breathing apparatus using chemically bound oxygen. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):69-83. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.69-83 (rus).

✉ Vitaliy Vyacheslavovich Krymskiy, e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Введение

Производство и усовершенствование дыхательных аппаратов в нашей стране началось с царских времен, когда еще на вооружении подразделений пожарной охраны (ПО) не было эффективных средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения (СИЗОД). Пожарные до XX века шли в дым, зажимая во рту мокрую тряпку или рукавицу, а носовую часть лица закрывали мокрой тканью, что не могло обеспечить необходимую защиту от отравления продуктами горения. Основопологающим моментом в развитии данного направления явилась первая мировая война. После ее окончания на вооружении у Ленинградских пожарных появился «дыхательный прибор» инженера М.Н. Вассермана. В 1926 г. в Ленинградской ПО начали применять немецкие фильтрующие противогазы Дега, прибор Дрегера. Но все эти зарубежные дыхательные аппараты не позволяли советской ПО достигать поставленных задач.

Группа единомышленников-энтузиастов во главе с Владимиром Владимировичем Дехтеревым (а также Г.Е. Селицкий и М.Ф. Юскин) были заинтересованы нерешенной проблемой защиты пожарных от воздействия опасных факторов пожара. В те времена были разработаны новые аппараты: кислородно-изолирующие противогазы (КИП). Энтузиасты подробно изучили аспекты работы подразделений горноспасательной службы Донбасса, в частности их опыт тушения крупных пожаров в горных рудниках с применением КИПов.

Непосредственно в Донбассе В.В. Дехтерев и Г.Е. Селицкий ознакомились с материальной частью и принципами работы КИПов, а также получили заключение о допуске к работе с использованием СИЗОД, и особенностями организации газодымозащитной службы (ГДЗС) горноспасательной службы Донбасса. В Ленинграде они продолжили свою работу, исследуя область применения, принципы действия и устройство КИПов, однако, следует отметить, что в те времена мало кто доверял этим аппаратам и многие не использовали их.

В архивных данных приводится описание пожара, произошедшего 18.02.1933 в г. Ленинграде на Международном проспекте (современное наименование — Московский просп. г. Санкт-Петербурга). Пожар возник в подвальном помещении многоквартирного жилого дома. Используя на тот момент все силы и средства при продвижении к очагу пожара, пожарным не удалось достичь результата. Высокая плотность дыма и применение старых, находившихся на вооружении ПО противогазов было неэффективным. На тот момент в безвыходной ситуации руководство тушения пожара (ТП) приняло решение апробировать применение КИПов, которые доставили из Донбасса.

Лично сам В.В. Дехтерев, который был обучен теории применения аппаратов и знал их устройство, был привлечен к ТП. Быстро включившись в аппарат, он, преодолев плотный дым, смог обнаружить очаг пожара в подвале и быстро ликвидировал его. Это событие способствовало принятию решений по орга-

низации отделений ГДЗС, вооруженных КИПами, которые состояли из наиболее подготовленных пожарных, и их обучению основам применения, тактико-техническим характеристикам КИПов на специально разработанных курсах по работе в СИЗОД.

Таким образом, зародилось первое в советской ПО отделение ГДЗС и 01.05.1933 оно было включено в боевой расчет Ленинградского гарнизона ПО [1, 2].

Целью настоящей статьи является усовершенствование оснащения газодымозащитной службы подразделений пожарной охраны наиболее эффективными и подходящими для работы дыхательными аппаратами при тушении пожаров на станциях метрополитена, портовых верфях и судах, подземных паркингах и зданиях повышенной этажности.

Материалы и методы

В 2022 г. на территории Российской Федерации (РФ) произошло 352 323 пожара, что ниже показателей аналогичного периода прошлого года на 9,8 % (390 411 пожаров в 2021 г.). Из более чем 350 тыс. пожаров в 2022 г. свыше 68 тыс. (68 859, 19,5 % от общего количества) пожаров потушено с применением звеньев ГДЗС (рис. 1).

Несмотря на снижение количества пожаров, количество применений звеньев ГДЗС на пожарах остается на уровне 2021 г. (рис. 2).

Если рассматривать динамику за последние 5 лет, то, несмотря на тенденцию снижения деструктивных событий, количество пожаров, потушенных с приме-

нением звеньев ГДЗС, не претерпевает значительных изменений, что свидетельствует о ключевой роли ГДЗС в своевременном оказании помощи пострадавшим, значительном сокращении времени ТП и минимизации экономического ущерба от них [3].

По состоянию на 31 декабря 2022 г. в РФ количество личного состава, аттестованного на право проведения работы в СИЗОД, составило 134 544 человека (рис. 3).

По сравнению с 2021 г. отмечается увеличение списочной численности личного состава ГДЗС территориальных пожарно-спасательных подразделений (ПСП) на 1804 человека или 3,5 %.

По состоянию на конец 2022 г. в подразделениях ПО на вооружении состояли 115 342 дыхательных аппарата на сжатом воздухе (ДАСВ), из которых в резерве — 26 501 единица. В ремонте находились 1541 ДАСВ, а списанию подлежали 30 980 аппаратов.

Общее количество стоящих на вооружении подразделений ПО дыхательных аппаратов на сжатом кислороде (ДАСК) по состоянию на конец 2022 г. составляет 4330 дыхательных аппарата, из которых в резерве — 1048 единиц. В ремонте находились 184 ДАСК, а списанию подлежали 2633 аппарата (рис. 4).

Стоит отметить, что ДАСК стоят в боевом расчете ПСП ФПС ГПС только в некоторых ГУ МЧС России по субъектам РФ, а именно в ГУ МЧС России по Калининградской и Свердловской областям, г. Москве и Санкт-Петербургу.

В подразделениях ФПС ГПС содержатся 64 % ДАСК, срок службы которых превышает 10 лет (рис. 5). Наиважнейшую роль в поддержании ДАСК в исправ-

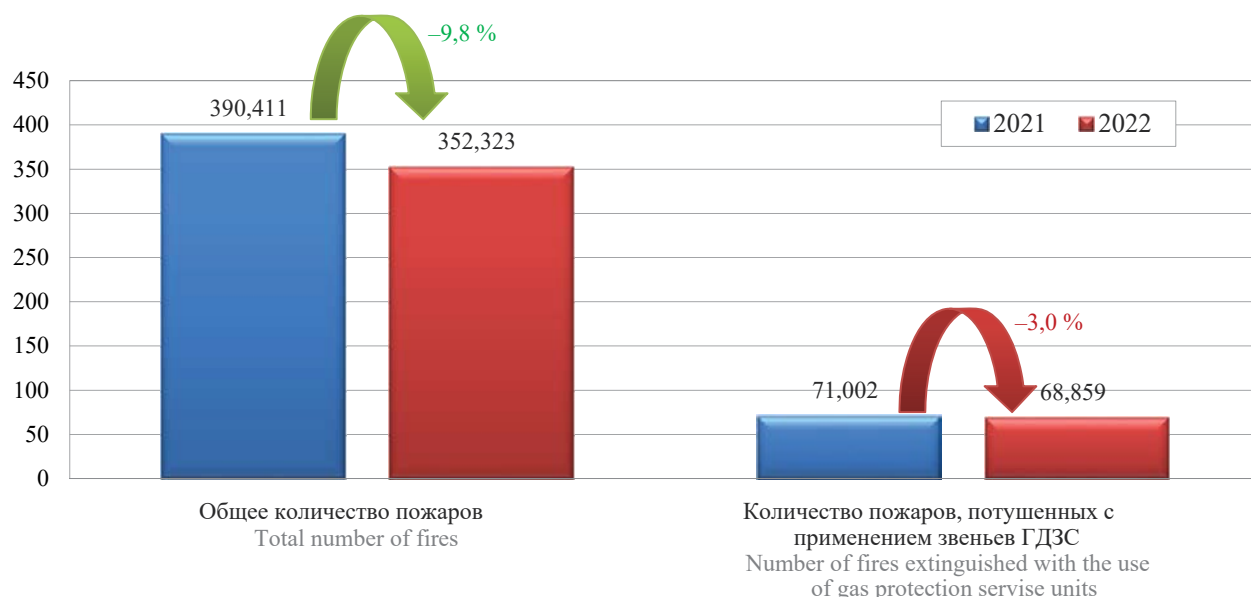


Рис. 1. Общее количество пожаров, количество пожаров, потушенных с применением звеньев ГДЗС (здесь и далее источник статистических данных — «Анализ деятельности газодымозащитной службы за 2022 год»)

Fig. 1. Total number of fires, number of fires extinguished with the use of gas protection service units (hereinafter the source of statistical data “Analysis of the activities of the gas and smoke protection service for 2022”)

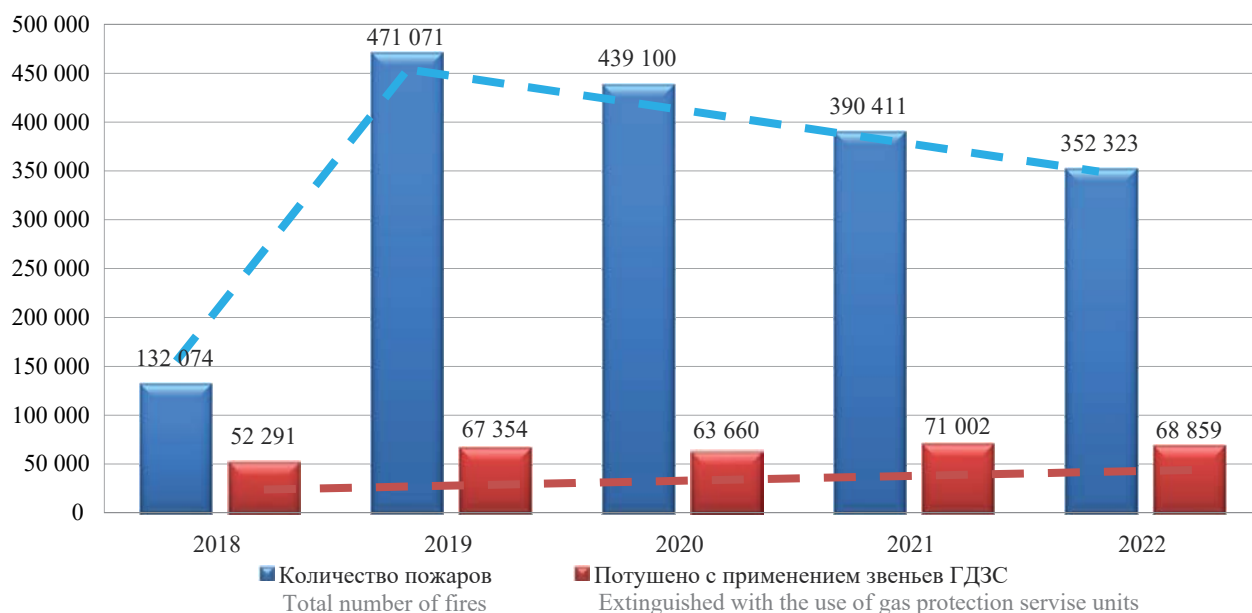


Рис. 2. Статистические данные по количеству пожаров, которые были потушены с применением звеньев ГДЗС за 2018–2022 гг.
Fig. 2. Number of fires extinguished with the use of gas protection service units for 2018–2022 гг.

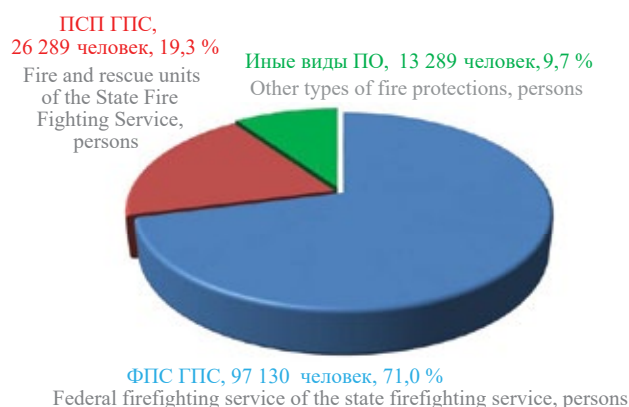


Рис. 3. Количество личного состава ГДЗС в подразделениях ПО РФ

Fig. 3. Number of personnel of gas protection service units in fire-fighting units of the Russian Federation

ном состоянии играет их качественное техническое обслуживание и при необходимости ремонт.

Основное целевое назначение баз ГДЗС — это обеспечение создания условий для технического ремонта, обслуживания и восстановления СИЗОД, устранения неисправностей в их работе, замены отдельных элементов СИЗОД.

По состоянию на конец 2022 г. в подразделениях ФПС ГПС эксплуатируется 5838 установок для проверки СИЗОД, что составляет 64 % от положенных по нормам. В течение 2022 г. техническое обслуживание и ремонт СИЗОД проводились на 799 базах ГДЗС и 2971 обслуживающем посту ГДЗС (рис. 6).

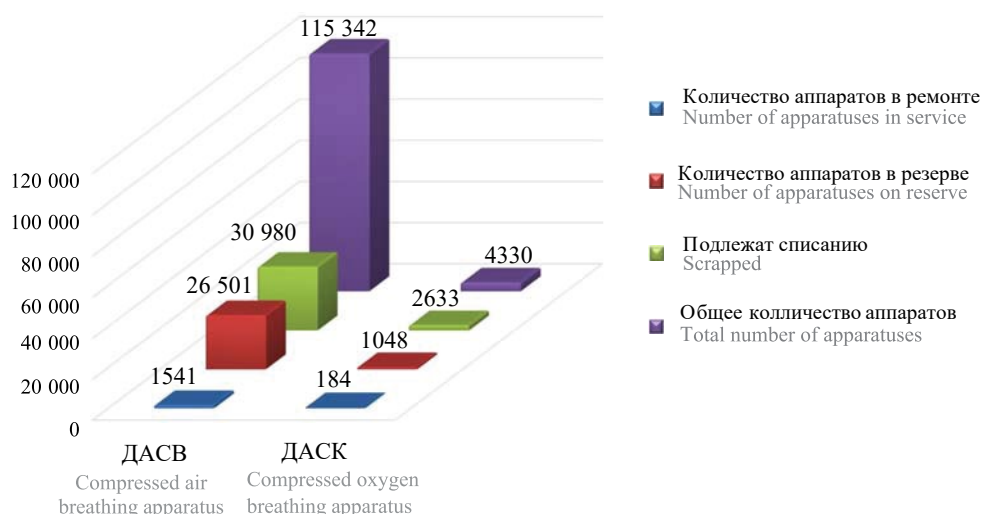


Рис. 4. Статистические данные по количеству дыхательных аппаратов на вооружении ПО РФ

Fig. 4. Statistical data on the number of breathing apparatus in service with the fire brigade of the Russian Federation

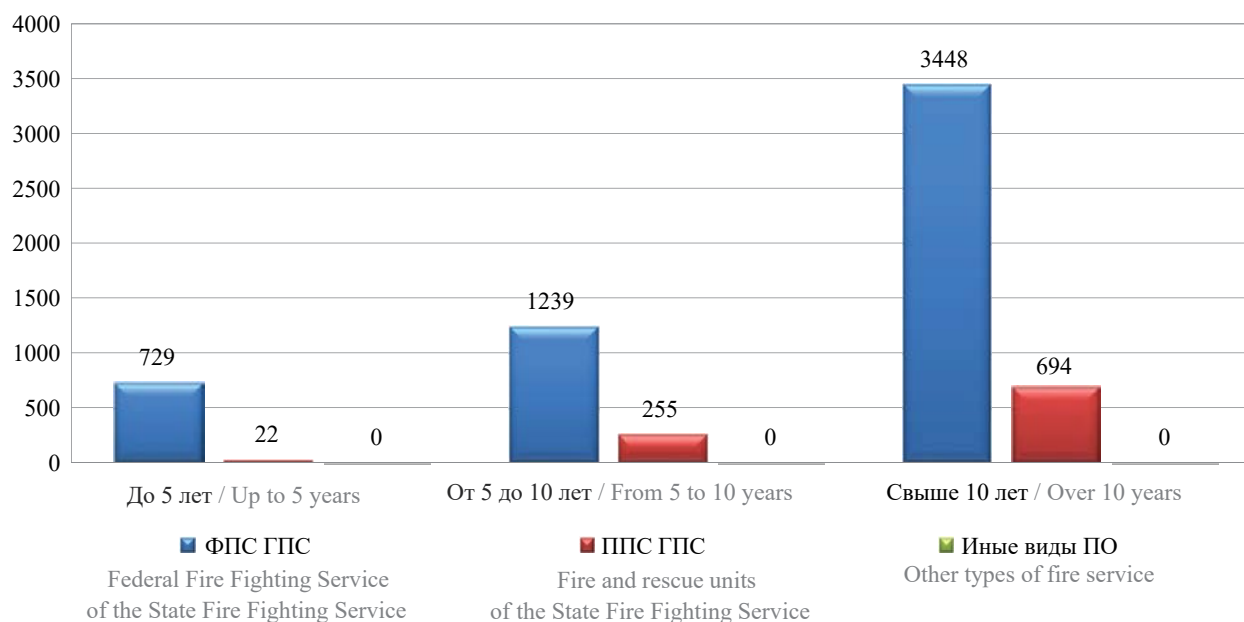


Рис. 5. Состояние ДАСК по срокам эксплуатации

Fig. 5. Status of compressed oxygen breathing apparatus by service life

Анализ состояния технического обеспечения баз ГДЗС в РФ и вопросов их создания показывает, что за последние пять лет количество баз ГДЗС остается практически неизменным, несмотря на это в настоящее время стоит вопрос о низком уровне оснащённости баз ГДЗС и обслуживающих постов ГДЗС ввиду ряда причин, а именно:

1. Естественного износа имеющегося оборудования и невозможности осуществления его ремонта.
2. Недостаточного финансирования для дооснащения соответствующим оборудованием, отдель-

ными запасными частями, инструментами и принадлежностями, инвентарем [4, 5].

Результаты

В целом, если анализировать деятельность ГДЗС ПСП РФ, можно констатировать факт очень малого количества ДАСК на вооружении и, к сожалению, наличия их только в четырех субъектах РФ, хотя станции метрополитена имеются в семи городах РФ, а количество портовых городов шестьдесят семь. Больше всего портов в РФ в Дальневосточном

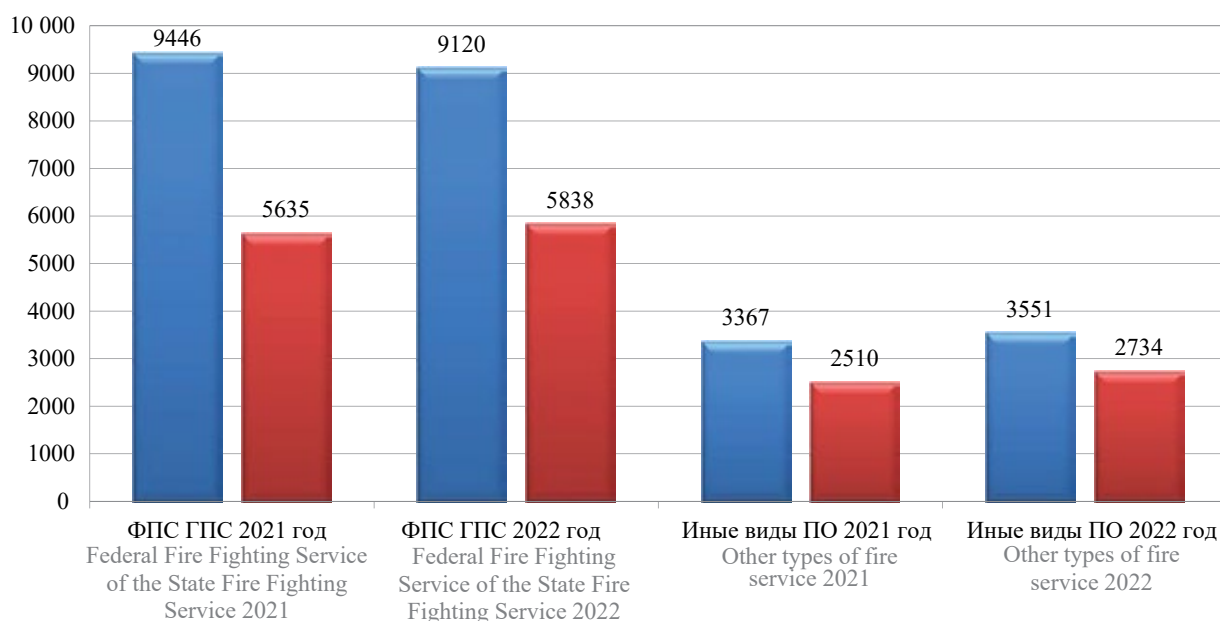


Рис. 6. Количество установок для обслуживания СИЗОД

Fig. 6. Number of installations for maintenance of personal respiratory protection equipment

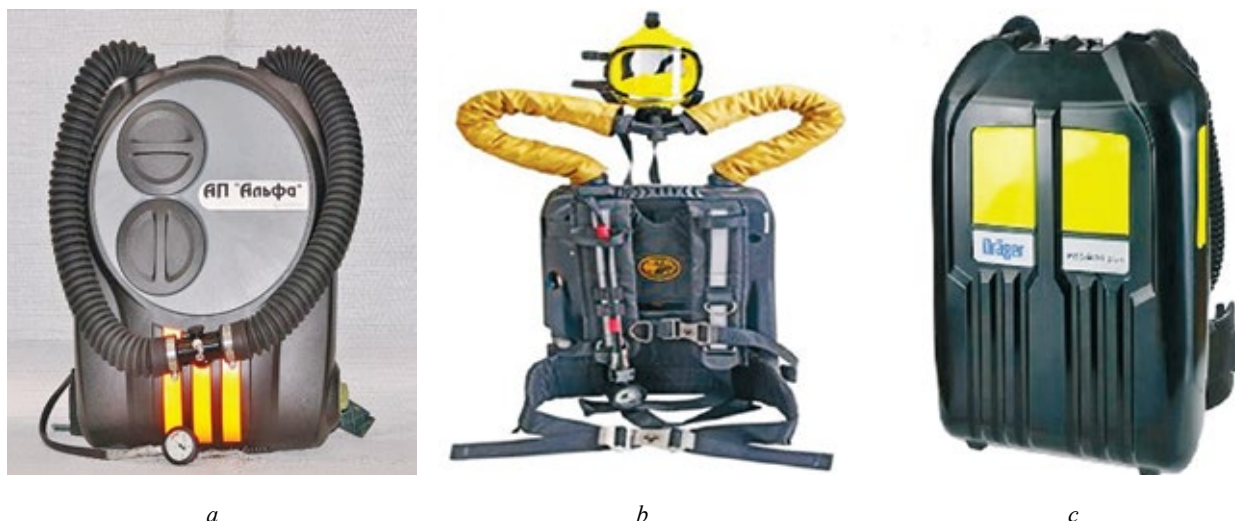


Рис. 7. ДАСК, находящиеся на вооружении ПСП РФ: *a* — общий вид ДАСК «АП Альфа». URL: https://perm.pulscen.ru/products/apparat_dykhatelny_ap_alfa_236722761; *b* — общий вид ДАСК «ПТС Окси огнеборец». URL: <https://satu.kz/p39081018-pts-oksi-ognebores.html>; *c* — общий вид ДАСК «Dräger PSS BG 4 plus». URL: https://www.draeger.com/ru_ru/Products/PSS-BG-4-plus

Fig. 7. Compressed oxygen breathing apparatus in service with fire and rescue units of the Russian Federation: *a* — general view of compressed oxygen breathing apparatus “AP Alfa”. URL: https://perm.pulscen.ru/products/apparat_dykhatelny_ap_alfa_236722761; *b* — general view of compressed oxygen breathing apparatus “PTS Oxy Firefighter”. URL: <https://satu.kz/p39081018-pts-oksi-ognebores.html>; *c* — general view of compressed oxygen breathing apparatus “Dräger PSS BG 4 plus”. URL: https://www.draeger.com/ru_ru/Products/PSS-BG-4-plus

бассейне (22), второй регион по их количеству — Арктический (18).

Номинальное время защитного действия ДАСК составляет не менее 240 мин. Такое количество времени работы в непригодной для дыхания среде (НДС) позволяет ПСП увеличить время работы звеньев ГДЗС при проведении разведки при ТП, а также проводить успешные операции по спасению людей и имущества.

На сегодняшний день и самих моделей ДАСК, стоящих на вооружении в ПСП, очень ограниченное

количество, в связи с тем, что данное направление обеспечения безопасности участников ТП, к сожалению, было «неактуально» несколько лет, а также дороговизной стоимости самих ДАСК, их содержания и ремонта (рис. 7).

В США наиболее известным по популярности среди пожарных является СИЗОД «BioPak 240R» (рис. 8). Это рециркуляционный аппарат на сжатом кислороде (СК). Следует отметить, что внешне ДАСК АП «Альфа» полностью повторяет ДАСК «BioPak 240R». Данный ДАСК — это совместная работа нескольких крупнейших производителей пожарно-спасательного оборудования мирового уровня, среди которых очень известная для пожарных Санкт-Петербурга фирма Scott. Данная модель очень популярна в США как при ТП, так и при работе водолазов при погружении под воду (с некоторыми доработками).

Существует еще один зарубежный аналог ДАСК — дыхательный аппарат на химическом связанном кислороде (ХСК), который имеет широкое распространение среди пожарных стран Европейского Союза, но очень затратный из-за его цены при покупке и дороговизны обслуживания — «MSA Auer Air Elite 4h» (рис. 9).

Неоспоримыми положительными особенностями дыхательных аппаратов, работающих на СК, являются очень экономный расход запаса кислорода, а также возможность контроля пожарным, использующим аппарат, запаса кислорода [6] при помощи манометра и наличие специального сигнального устройства, сигнализирующего о снижении давления кислорода в баллоне, что повышает уровень обес-



Рис. 8. Общий вид ДАСК «BioPak 240R». URL: taty-polzovateley/kislorodnye-dyxatelnye-apparaty/

Fig. 8. General view of compressed oxygen breathing apparatus “BioPak 240R”. URL: taty-polzovateley/kislorodnye-dyxatelnye-apparaty/



Рис. 9. Общий вид ДАСК «MSA Auer Air Elite 4h». URL: taty-polzovateley/kislorodnye-dyxatelnye-apparaty/

Fig. 9. General view of compressed oxygen breathing apparatus “MSA Auer Air Elite 4h”. URL: taty-polzovateley/kislorodnye-dyxatelnye-apparaty/

печения безопасности пользователя. Номинальное время их защитного действия составляет четыре часа при непрерывной работе.

Но, наряду с положительными особенностями, ДАСК имеют и свои недостатки, например:

- не допускается использовать ДАСК при ТП на объектах, где по особенностям технологического процесса производства их использование запрещено;
- запрещается использование ДАСК в комплекте со специальной защитной одеждой от тепловых воздействий, за исключением боевой одежды пожарных и специальной защитной одежды изолирующего типа;
- при оказании помощи газодымозащитнику непосредственно в НДС необходимо для ДАСК наполнить кислородом при помощи устройства дополнительной подачи кислорода (байпаса) дыхательный мешок до срабатывания избыточного клапана;
- сложность в техническом устройстве, что приводит к технологичности и трудоемкости их изготовления, а также настройки системы подачи кислорода;
- сложности в необходимости наличия компрессорного оборудования для заправки баллонов кислородом, которое также необходимо для компенсации утечек кислорода при хранении, а именно при проведении проверок [6].

На практике при проведении работ по ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах ведения горных

работ, когда использование ДАСВ неэффективно, для защиты органов дыхания помимо ДАСК широко применяются респираторы с ХСК. Среди аппаратов подобного класса можно привести такие, как РХ-4Е, РХ-4П, РХП, ДАХ (НИИГД «РЕСПИРАТОР», г. Донецк); РХ-90Т, РХ-90ТМ (ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов).

В Минском городском управлении МЧС Республики Беларусь с 2008 г. введены в эксплуатацию взамен ДАСК двадцать два дыхательных аппарата с ХСК «MSA Auer Air Elite 4h».

Относительно небольшое количество данных СИЗОД позволяет при групповом закреплении организовать работу 4 звеньев ГДЗС в первую очередь на объектах метрополитена. Учитывая небольшую глубину залегания коммуникаций Минского метрополитена и длину перегонных путей не более 1500 м, применение данного типа СИЗОД осуществляется совместно с ДАСВ, укомплектованными двумя воздушными баллонами с увеличенным временем защитного действия. Положительный экономический эффект от принятия на вооружение в подразделения ПО Минского городского управления МЧС СИЗОД с ХСК является существенным с учетом незначительного количества прогнозируемых случаев применения данных СИЗОД.

Из положительных особенностей респираторов на ХСК следует отметить прежде всего простоту конструкции, создание благоприятных условий для дыхания пользователя, низкий расход кислорода.

Использование респираторов ХСК не подразумевает необходимости создания компрессорных станций и наличие специального персонала для их обслуживания. Неоспоримым преимуществом респираторов ХСК является возможность их длительного хранения (до 2 лет) в состоянии боевой готовности к применению, что является главным отличием от изолирующих аппаратов, работающих на СК [6], у которых срок хранения снаряженных регенеративных патронов не превышает 6 месяцев, при условии соблюдения гарантийного срока хранения химического поглотителя.

Следует отметить и отрицательные особенности применения респираторов на ХСК, такие как, например, отсутствие возможности контроля запаса времени работы в НДС. Для обеспечения безопасности пользователя респираторов на ХСК учитывается, что время защитного действия в НДС не должно превышать 10–20 % ниже гарантированного.

Существующий в наши дни опыт научных разработок и промышленного применения дыхательной аппаратуры на ХСК, в первую очередь самоспасателей, выступил базой для разработки современных моделей, созданных за последние годы в РФ. Это респираторы с ХСК в НИИГД «РЕСПИРАТОР» РХ-4Е (рис. 10), РХ-4П, РХП, ДАХ.

Данная модель предназначена для индивидуальной защиты органов дыхания человека при выполнении тяжелых горноспасательных и технологических работ в угольных шахтах и рудниках в НДС. ХСК «РХ-4Е» не имеет зарубежных аналогов (рис. 11).

По сравнению с ДАСК, респиратор с ХСК «РХ-4Е» имеет следующие преимущества [8]:

- адаптированный микроклимат дыхания, обусловленный тем, что энтальпия вдыхаемого воздуха



Рис. 10. Общий вид аппарата на ХСК «РХ-4Е». URL: <https://ua.bizorg.su/respiratory-r/p18240890-respirator-rkh4e>

Fig. 10. General view of chemically bound oxygen apparatus «PX-4E». URL: <https://ua.bizorg.su/respiratory-r/p18240890-respirator-rkh4e>

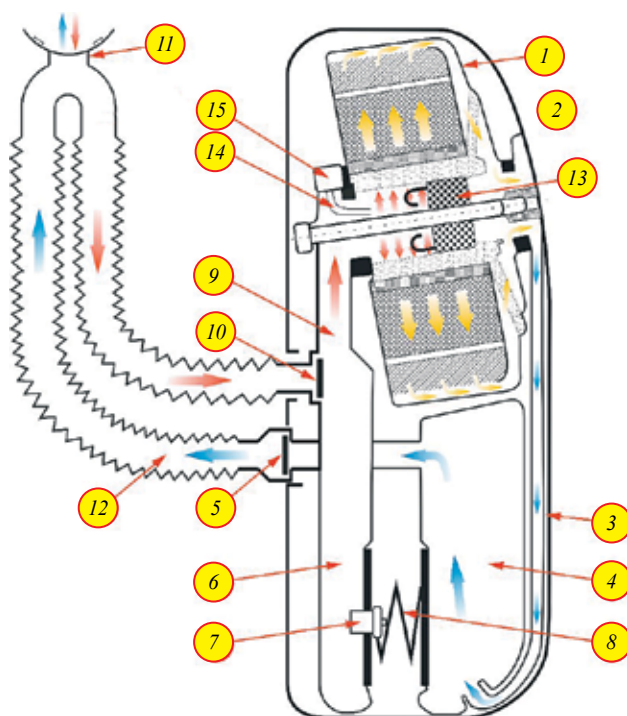


Рис. 11. Принципиальная схема дыхательного аппарата «РХ-4Е»: 1 — регенеративный патрон; 2 — корпус; 3 — теплообменник; 4 — мешок вдоха; 5 — клапан вдоха; 6 — мешок выдоха; 7 — избыточный клапан; 8 — прижимное устройство; 9 — воздуховод выдоха; 10 — клапан выдоха; 11 — лицевая часть; 12 — шланг вдоха; 13 — пусковой брикет; 14 — трубка пускового устройства; 15 — груша пускового устройства [7]

Fig. 11. Principal scheme of the «RX-4E» respirator: 1 — Regenerative cartridge; 2 — Body; 3 — Heat exchanger; 4 — Inhalation bag; 5 — Inhalation valve; 6 — Exhalation bag; 7 — Exhaust valve; 8 — Pressure device; 9 — Exhalation duct; 10 — Exhalation valve; 11 — Face piece; 12 — Inhalation hose; 13 — Starting briquette; 14 — Starting device tube; 15 — Starting device pear [7]

ниже выдыхаемого, таким образом в сравнении с аппаратами других типов дыхательный аппарат «РХ-4Е» отводит тепло из организма человека. Данный факт крайне необходим при проведении работ по ТП под воздействием интенсивного теплового потока, а также при существенных физических нагрузках, испытываемых пожарными в боевой одежде;

- создание условий для равномерной подачи (в меру потребности) кислорода, минимизируя расход его потребления. В регенеративном автономном дыхательном аппарате искусственная атмосфера для дыхания создается за счет регенерации выдыхаемого воздуха путем поглощения диоксида углерода и добавления кислорода из химического вещества в аппарате, после чего регенерированный воздух подается на вдох. Принцип построения данной системы обеспечения дыхания потребителя построен на замкнутом цикле, изолированном от внешней атмосферы;
- рациональное потребление запаса кислорода и, как следствие, увеличение времени защитного

действия (ВЗД) в ожидании помощи до 24 ч, что в несколько раз превышает значения тактико-технических характеристик ДАСК;

- за счет потенциальной возможности использования респиратора в режиме самоспасателя происходит увеличение ВЗД примерно на 15–25 %, обусловлено это тем, что ВЗД респиратора с ХСК регламентируется концентрацией во вдыхаемом воздухе углекислого газа на отметке около 1,5 %, а кислородсодержащая смесь с необходимым количеством кислорода и допустимой концентрацией углекислого газа (до 3 %) поступает на протяжении еще 15–25 % времени от ВЗД;
- низкая себестоимость, обусловленная простотой конструктивных элементов и изделия в целом, низкой трудоемкостью производства;
- отсутствие необходимости в содержании дорожного компрессорного оборудования для обслуживания респираторов. Благодаря этой особенности респираторов их можно готовить к использованию в любых условиях, в том числе непосредственно на пожаре, что значительно повышает показатели оперативности;
- регенерация физиологических функций организма, которая протекает в 5–6 раз быстрее, чем в аппаратах со СК, благодаря высокой температуре в зоне химических реакций регенерации, способствующей «дожиганию» всех продуктов метаболизма человека;
- возможность укомплектования аппарата регенеративными патронами с номинальным ВЗД, равным 2 и 4 ч, что позволяет повысить его тактико-эксплуатационные свойства в зависимости от решаемых задач в различных условиях.

В качестве источника кислорода и поглотителя диоксида углерода в дыхательных аппаратах применяются регенеративные продукты на основе надпероксида калия, сформированного в виде гранул, таблеток или многоканальных блоков.

Несмотря на то что величина удельной энтальпии воздуха в аппарате с ХСК ниже, чем воздуха на выходе из патрона с известковым или щелочным поглотителем диоксида углерода (что создает более комфортные условия дыхания), следствием экзотермического характера протекающих регенеративных процессов являются повышение температуры на вдохе, снижение относительной влажности дыхательной смеси (до 10 %), неоднородный характер отработки продукта, резкое повышение сопротивления дыханию. Это приводит к преждевременному истощению ресурса работы регенеративного патрона при наличии неотработанных гранул продукта [8].

Данный вопрос для ПСП РФ является очень актуальным. Так, например, в одиннадцати ПСП Санкт-Петербурга (СПб) эксплуатируются: ДАСК

ПТС «ОКСИ огнеборец» — 203 единицы и Drager «BG-4» — 277 единиц. Потребность ПСП города в ДАСК, с учетом необходимости индивидуального закрепления за газодымозащитниками, составляет 403 единицы. Учитывая, что в 2025 г. у 80 % эксплуатируемых в ПСП СПб ДАСК ПТС «ОКСИ огнеборец» истекают установленные сроки эксплуатации, возникает необходимость проработки наиболее эффективного плана переоснащения данным типом СИЗОД ПСП СПб [9–11].

В октябре 2018 г. для проведения опытной эксплуатации в ПСП СПб ООО «Торговый дом РУСИНТЕК» предоставило дыхательные аппараты «AirElite 4h» с замкнутым контуром регенерации воздуха для дыхания, в комплекте с дыхательными канистрами на 4 часа работы («AirElite 4h») и комплектом «AirElite 4h HD» (для преобразования в учебное устройство).

Опытная эксплуатация (испытания) дыхательных аппаратов «MSA Auer Air Elite 4h» проводилась под руководством дежурной смены службы пожаротушения в ПСП, эксплуатирующих ДАСК. Опытные образцы аппаратов подверглись испытаниям при проведении тренировок как на свежем воздухе, так и в дымокамере и огневом учебно-тренировочном полигоне в условиях, максимально приближенных к реальной работе на пожарах. Состав возрастной группы при проведении испытаний: сотрудники (работники) ПСП СПб, в возрасте от 25 до 45 лет, со стажем работы от 6 до 24 лет. Оценка работы в предоставленных образцах осуществлялась исходя из субъективных ощущений конкретных газодымозащитников, на основании сравнительного анализа эксплуатации и применения (работы) имеющихся на вооружении в подразделениях дыхательных аппаратов на СК «PSS BG 4 plus» и ПТС «ОКСИ огнеборец».

Основной задачей при проведении испытаний являлось определение степени комфортности (удобства) работы в различных условиях (воздействия температур, ограниченного пространства, нагрузок различной степени тяжести и т.д.). Для сравнительной оценки выбирались упражнения по степени тяжести от «легкой» до «очень тяжелая» в соответствии с оценкой некоторых видов работ и упражнений по степени тяжести.

При нагрузках, характеризующихся по степени тяжести как «тяжелая» и «очень тяжелая», у испытуемых отмечалось увеличение сопротивления дыханию на вдохе. Однако благодаря комфортному температурному режиму дыхательной смеси после нагрузок газодымозащитники достаточно быстро восстанавливались [12, 13].

Испытания образцов дыхательных аппаратов «MSA Auer Air Elite 4h» в теплодымокамере показали, что аппараты сохраняют работоспособность

после кратковременного пребывания в среде с температурой (200 ± 20) °С, при этом температура вдыхаемой газовой смеси была комфортной для работы. Температура окружающей среды, нагрев основных узлов «MSA Auer Air Elite 4h» [14, 15] от воздействия лучистого теплового потока не повлияли на температуру вдыхаемой газовой смеси, что в сравнении с аналогами (дыхательных аппаратов на СК «PSS BG 4 plus» и ПТС «ОКСИ огнеборец») значительно увеличивает эффективность работы в данном типе аппаратов. По общему мнению испытуемых, воздушная смесь при работе в «MSA Auer Air Elite 4h» [16] оставалась сухой вне зависимости от длительности проведения работ и температуры окружающей среды (в отличие от аналогов «PSS BG 4 plus» и ПТС «ОКСИ огнеборец»).

Система контроля и индикатор расхода IC-Air (на правом плечевом ремне) легко доступны и надежно защищены от механических повреждений, размещение индикатора позволяет видеть его показания в лицевой части при проведении периодического контроля значений во время работы в аппарате. Конструкция устройства позволяет контролировать его показания при слабом освещении, солнечном свете и в темноте.

Эргономично выполненные подвесная и амортизирующая системы позволяют удобно зафиксировать аппарат на спине, не вызывая потертостей и ушибов при работе. Возможность циркуляции воздуха между аппаратом и одеждой пожарного предотвращает воздействие на его тело нагретой или охлажденной поверхности корпуса. Системы ремней аппарата оснащены удобными устройствами для регулировки их длины и степени натяжения. Устройство подвесной системы позволяет снимать и перемещать перед собой аппарат без выключения из него при перемещении по тесным помещениям и узким лазам. Учитывая небольшие габариты (что является положительным техническим решением), вес аппарата незначительно больше аналогов («PSS BG 4 plus» и ПТС «ОКСИ огнеборец»).

Выгодное расположение дыхательных шлангов на представленных образцах увеличивает спектр выполняемых газодымозащитниками задач по переноске пожарно-технического вооружения и оборудования (освобождаются плечи, исключается возможность сдавливания дыхательных шлангов, увеличивается угол поворота головы пользователя, и, как следствие, увеличивается угол обзора, что играет немаловажную роль в процессе ликвидации аварий и тушении пожаров).

В значительной мере при расчете экономической эффективности укомплектования данными аппаратами следует отметить, что, согласно име-

ющейся технической документации, для его содержания и хранения отдельно развивать инфраструктуру (оборудование помещений для наполнения и снаряжения поглотителя химического известкового (ХП-И), компрессорных станций, закупки компрессорного оборудования, ХП-И и т.д.) нет необходимости. Возможность длительного хранения снаряженных аппаратов без периодических проверок указывает на высокий уровень ответственности изготовителя оборудования в выборе материалов и конструктивной схеме аппарата. Широкий ассортимент канистр для данных аппаратов (в том числе учебных), предусмотренных производителем, дает возможность пользователям оборудования самостоятельно произвести расчет экономической эффективности с учетом планирования учебных занятий и возможного применения данных аппаратов при ТП [17–20].

Выводы

1. Приоритетность применения дыхательных аппаратов с четырехчасовым сроком защитного действия ГДЗС ПСП СПб и в целом РФ обусловлена необходимостью организации и проведения работ по ТП в НДС, на имеющихся в районах выезда станций метрополитена и иных подземных коммуникаций глубокого заложения, строящихся и находящихся на плаву морских судов на верфях и в портах, подземных автостоянках и зданиях повышенной этажности, подвальных и технологических помещений сложной планировки.

2. К достоинствам аппаратов на ХСК относятся: простота конструкции, экономичный и равномерный расход кислорода, высокое удельное ВЗД, высокие гарантийные сроки хранения регенеративного продукта, возможность длительного пребывания в состоянии ожидания использования при минимальных проверках готовности в течение хранения, возможность при организации учебного процесса использовать учебные канистры без использования регенеративного продукта, что вне всяких сомнений имеет высокий эффект экономии финансовых средств. При их применении исключается необходимость иметь кислородонаполнительные пункты или криогенное хозяйство. К недостаткам аппаратов на ХСК относятся: невозможность осуществления длительных перерывов в работе (более 1–2 часов), высокая стоимость одного включения из-за цены регенеративного продукта (разового применения), высокая объемная доля кислорода во вдыхаемом продукте (до 99 %).

3. Опытная эксплуатация в ПСП СПб дыхательных аппаратов на ХСК «MSA Auer Air Elite 4h» показала, что в сравнении с имеющимися в эксплуатации в ПСП СПб ДАСК дыхательные аппараты на ХСК

более комфортны в части, касающейся поддержания оптимального температурного режима дыхательной смеси, после нагрузок сотрудники ПСП достаточно быстро восстанавливались.

4. Для совершенствования конструкции лицевой части СИЗОД, повышения удобства и эргономики конструкции необходимо рассмотреть вопрос о разработке лицевых частей с адаптерами для крепления к пожарному шлему аналогично конструкции компании Drager. Данная конструкция позволит сделать включение более быстрым, оперативным и безопасным. Безопасность включения в дыхательный аппарат при ТП достигается отсутствием необходимости снятия пожарного шлема при включении газодымозащитника в СИЗОД.

В варианте исполнения лицевой части наиболее удобен вариант использования оголовья в виде сетки с текстильной ременной системой с увеличенным углом обзора аналогично конструкции дыхательных аппаратов компании Scott, используемые в дыхательных аппаратах Scott 2.2, а также Scott 4.5.

Данная конструкция позволит повысить надежность узла крепления, особенно в условиях колебания температур. Также, принимая во внимание повышенную влажность воздуха при работе в СИЗОД на ХСК, возможно дополнение дыхательного аппарата стеклоочистителем либо вариантом исполнения с функцией антизапотевания. При использовании стеклоочистителя необходимо рассмотреть вопрос об использовании не поликарбонатного стекла лицевой части, а триплексного с повышенной абразивной стойкостью.

Принимая во внимание анатомические особенности газодымозащитников, с целью обеспечения максимального комфорта и надежности прилегания лицевой части стоит рассмотреть возможность выпуска 3 размеров лицевых частей с разделением их по цветам для наиболее удобной идентификации.

5. В условиях жесточайших санкций в отношении РФ и невозможности обслуживания приобретенных ранее ДАСВ и ДАСК иностранного производства во всех видах ПО необходимо МЧС России и Министерству промышленности и торговли РФ в кратчайшие сроки рассмотреть вопрос разработки современных ДАСК отечественного производства с учетом наработанных в этой области инженерных решений и практического опыта (использования ДАСК).

6. Перспективами развития дыхательных аппаратов на ХСК в последние 2 десятка лет занимаются НИИГД «Респиратор» (ДНР) и ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (Россия), при этом кислородосодержащий продукт, разрабатываемый ОАО «Корпорация «Росхимзащита», обладает в 1,6–1,7 раза

выше сорбционной способностью по сравнению с серийно выпускаемым продуктом ОКЧ-3. Продукция НИИГД «Респиратор», в частности респиратор Р-30, по мнению большинства респираторщиков СПб, эксплуатирующих данные СИЗОД в период до 2002 г., имеет большое количество положительных отзывов, в сравнении с образцами оборудования, производимыми ОАО «КАМПО» и ООО «ПТС». Большой накопленный опыт НИИГД «Респиратор» (ДНР) и ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (Россия) может способствовать развитию направления в техническом перевооружении подразделений ПО дыхательными аппаратами на ХСК.

7. Потребность в дыхательных аппаратах с условным временем защитного действия не менее 240 мин ПСП СПб, с учетом индивидуального закрепления за личным составом отделений ГДЗС, составляет порядка 800 ед. (ДАСК). При индивидуальном закреплении дыхательных аппаратов на ХСК достаточное количество — 250 ед. Учитывая экономическую эффективность от принятия на вооружение данного типа СИЗОД, вопрос о разработке современного типа дыхательного аппарата с условным временем защитного действия не менее 240 мин, с ХСК является в значительной степени актуальным.

8. После разработки и серийного производства в РФ СИЗОД на ХСК для подразделений ПО необходимо внести изменения в технический регламент ТР ЕАЭС 043/2017 как самостоятельный тип изолирующего СИЗОД на ХСК для ПСП. И, как следствие, разработать национальный стандарт, в котором бы содержались требования и методы испытаний к такому типу пожарно-технической продукции. Далее внести изменения в п. 5 ГОСТа Р 58446–2019¹ с добавлением туда аббревиатуры — дыхательный аппарат на химически связанном кислороде (ДАХСК).

9. После внесения изменений в технический регламент ТР ЕАЭС 043/2017² и п. 5 ГОСТа Р 58446–2019¹ необходимо также внести изменения в Приказ МЧС РФ № 640³ и другие нормативные документы РФ, добавив в них аббревиатуру ДАХСК.

¹ ГОСТ Р 58446–2019. Техника пожарная. Комплект снаряжения для оснащения личного состава звена газодымозащитной службы.

² ТР ЕАЭС 043/2017. О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения : Технический регламент Евразийского экономического союза.

³ Об утверждении Правил использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения личным составом подразделений пожарной охраны : Приказ МЧС России от 27 июня 2022 г. № 640.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крымский В.В., Ильницкий С.В., Гайдукевич А.Е. 9.2. Автоматизация учета, эксплуатации, испытаний и работы пожарной техники и пожарно-технического вооружения и оборудования // Аудит и финансовый анализ. 2020. № 1. С. 238–242. DOI: 10.38097/AFA.2020.16.25.034. EDN MPZTKB.
2. Kim S.J., Ham S. Evaluation of air quality inside self-contained breathing apparatus used by firefighters // Fire. 2023. Vol. 6. No. 9. P. 347. DOI: 10.3390/fire6090347. EDN CHRYLH.
3. Kim S.J., Ham S. Система риск-контроллинга промышленного предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2014. № 2 (192). С. 114–122. EDN SCHRRD.
4. Крымский В.В. 8.11. Оценка ущерба специалистами в области техногенных и природных чрезвычайных ситуаций // Аудит и финансовый анализ. 2016. № 5. С. 408–411. EDN XIELCL.
5. Польшко С.В., Дашкевич Е.И., Турснев С.А., Крымский В.В., Вакуленко С.В. Организация, управление и оборудование газодымозащитной службы. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. 440 с. EDN EGUCWW.
6. Горбатов В.А., Путин С.Б. Респиратор РХ-90Т — новое отечественное средство защиты органов дыхания горноспасателей // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 8. С. 36–37. EDN JUQFTF.
7. Кирьян А.П. Респиратор с химически связанным кислородом для защиты спасателей при ликвидации пожаров и аварий // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2019. № 1 (2). С. 132–138. EDN WQCCXX.
8. Кирьян А.А. Тенденции развития респираторов с химически связанным кислородом // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 3 (10). С. 210–216. EDN UMXSI.
9. Ехилевский С.Г., Потапенко Е.П. Совершенствование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде // Инновационное развитие современной науки: актуальные вопросы теории и практики : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. г. Пенза, 12 апреля 2021 г. Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. С. 46, 53.
10. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Симаненков Э.И., Соломенко Е.В., Путин С.Б. Теплоаккумулирующий материал с изменением фазового состояния для кислородного самоспасателя нового поколения // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 1. С. 109–119.
11. Ехилевский С.Г., Потапенко Е.П. Оптимизация теплового режима изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2021. Т. 66. № 1. С. 101–109. DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-1-101-109. EDN RMPLNS.
12. Алдабеков А.Т. Обзорная статья по созданию дыхательных аппаратов на сжатом кислороде // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны в год 90-летия со дня образования Академии ГПС МЧС России. г. Москва, 1 марта 2023 г. В 5-ти ч. Ч. II. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 389–395. EDN WGYDDF.
13. Verešová T., Svetlík J., Kalužník D. Verification of tactical and technical data of the breathing apparatus // Proceedings of CBU in Natural Sciences and ICT. 2021. Vol. 2. Pp. 100–104. DOI: 10.12955/pns.v2.160
14. Liu B., Zhang Y., Xu K., Zhang Y., Hao Z., Ma N. Study on a new type of composite powder explosion inhibitor used to suppress underground coal dust explosion // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 18. P. 8512. DOI: 10.3390/app11188512
15. Rutić S.Z., Stojisavljević P.N. Ocenjivanje usaglašenosti sredstava za zaštitu tela u skladu sa zahtevima standarda za zaštitnu odeću // Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier. 2018. Vol. 66. No. 3. Pp. 650–665. DOI: 10.5937/vojtehg66-13728
16. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88. EDN AJXKQH.
17. Corrêa C., Falcão A.G., Pereira Da Silva B.A., Martins W., Beça L., Melo Neto A.A. Firefighting: intensive training and improvement in air consumption in self-contained breathing apparatus (SCBA) // Concilium. English Language Edition. 2023. Vol. 23. No. 13. Pp. 127–133. DOI: 10.53660/clm-1540-23h61a. EDN WWSWLR.
18. Li J., Wang Y., Jiang R., Li J. Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting : a systematic review and meta-analysis // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2023. Vol. 29. Issue 1. Pp. 77–89. DOI: 10.1080/10803548.2021.2024020
19. Гринченко Б.Б., Тараканов Д.В. Модель управления безопасностью при работах на пожарах в непригодной для дыхания среде // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 6. С. 45–51. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.06.45-51. EDN XYXVFJ.

20. Захаров Е.Ю., Соколов Г.П. Анализ химических составов регенеративных патронов, используемых в изолирующих дыхательных аппаратах на химически связанном кислороде // Актуальные вопросы пожаротушения : сб. мат. II Всеросс. науч.-практ. конф. Иваново, 28 мая 2021 года. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. С. 130–133. EDN BFWUMX.

REFERENCES

1. Krymsky V.V., Ilnitsky S.V., Gaidukevich A.E. 9.2. Automation of accounting, operation, testing and operation of fire equipment and fire-technical weapons and equipment. *Audit and Financial Analysis*. 2020; 1:238-242. DOI: 10.38097/AFA.2020.16.25.034. EDN MPZTKB. (rus).
2. Kim S.J., Ham S. Evaluation of air quality inside self-contained breathing apparatus used by firefighters. *Fire*. 2023; 6(9):347. DOI: 10.3390/fire6090347. EDN CHRYLH.
3. Krymsky V.V., Pankov A.E. System of risk controlling industrial enterprises. *Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences*. 2014; 2(192):114-122. EDN SCHRRD. (rus).
4. Krymsky V.V. 8.11. Damage assessment experts in the field of technogenic and natural emergency situations. *Audit and Financial Analysis*. 2016; 5:408-411. EDN XIELCL. (rus).
5. Polynko S.V., Dashkevich E.I., Tursenev S.A., Krymskiy V.V., Vakulenko S.V. *Organization, Management and Equipment of the Gas and Smoke Protection Service*. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense of the Russian Federation, emergency situations and elimination of consequences of natural disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, 2023; 440. EDN EGUCWW. (rus).
6. Gorbатов V.A., Putin S.B. Respirator RH-90T — a new domestic means of protecting the respiratory organs of rescuers. *Occupational safety in industry*. 2005; 8:36-37. EDN JUQFTF. (rus).
7. Kiryan A.P. Respirator with chemically related oxygen for the protection of rescuers while eliminating fires and accidents. *Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement*. 2019; 1(2):132-138. EDN WQCCXX. (rus).
8. Kiryan A.A. Development trends of respirators with chemically bond oxygen. *Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement*. 2021; 3(10):210-216. EDN UMUKSI. (rus).
9. Yekhilevsky S.G., Potapenko E.P. Improvement of insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen. *Innovative Development of Modern Science: Topical Issues of Theory and Practice : collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Penza, April 12, 2021*. Penza, 2021; 46, 53. (rus).
10. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Simanenkov E.I., Solomenko E.V., Putin S.B. Heat storage material with phase change for a new generation oxygen self-rescuer. *Russian Chemical Journal*. 2013; 57(1):109-119. (rus).
11. Yekhilevsky S.G., Potapenko E.P. Optimization of the thermal regime of the insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*. 2021; 66(1):101-109. DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-1-101-109. EDN RMPLNS. (rus).
12. Aldabekov A.T. Review article on creation compressed oxygen breathing apparatus. *Civil Defense on Guard of Peace and Security : materials of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day in the Year of the 90th anniversary of the formation of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow, March 1, 2023. In 5 parts, Part II*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2023; 389-395. EDN WGYDDF. (rus).
13. Verešová T., Svetlík J., Kalužník D. Verification of tactical and technical data of the breathing apparatus. *Proceedings of CBU in Natural Sciences and ICT*. 2021; 2:100-104. DOI: 10.12955/pns.v2.160
14. Liu B., Zhang Y., Xu K., Zhang Y., Hao Z., Ma N. Study on a new type of composite powder explosion inhibitor used to suppress underground coal dust explosion. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8512. DOI: 10.3390/app11188512
15. Rutić S.Z., Stojisavljević P.N. Ocenjivanje usaglašenosti sredstava za zaštitu tela u skladu sa zahtevima standarda za zaštitnu odeću. *Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier*. 2018; 66(3):650-665. DOI: 10.5937/vojtehg66-13728 (srb).
16. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88. EDN AJXKQH. (rus).
17. Corrêa C., Falcão A.G., Pereira Da Silva B.A., Martins W., Beça L., Melo Neto A.A. Firefighting: intensive training and improvement in air consumption in self-contained breathing apparatus (SCBA). *Concilium. English Language Edition*. 2023; 23(13):127-133. DOI: 10.53660/clm-1540-23h61a. EDN WWSWLR.
18. Li J., Wang Y., Jiang R., Li J. Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting : a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2023; 29(1):77-89. DOI: 10.1080/10803548.2021.2024020

19. Grinchenko B.B., Tarakanov D.V. Safety management model for firefighting in unsuitable for breathing environment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(6):45-51. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.06.45-51. EDN XYXVFJ. (rus).
20. Zakharov E.Yu., Sokolov G.P. Analysis of chemical compositions of regenerative cartridges used in insulating breathing apparatus with chemically bound oxygen. *Topical Issues of Fire Extinguishing : collection of materials of the II All-Russian Scientific and practical conference, Ivanovo, May 28, 2021*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 130-133. EDN BFWUMX. (rus).

Поступила 02.04.2024, после доработки 05.07.2024;

принята к публикации 10.07.2024

Received April 2, 2024; Received in revised form July 5, 2024;

Accepted July 10, 2024

Информация об авторах

КРЫМСКИЙ Виталий Вячеславович, канд. эконом. наук, доцент, доцент кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149; ORCID: 0000-0001-8289-691X; e-mail: kvv-1982@yandex.ru

БОЙЦОВ Андрей Борисович, начальник службы пожаротушения Федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, наб. Реки Мойки, 85; ORCID: 0009-0009-8258-6167; e-mail: andrey.boytsov.78@yandex.ru

ДАШКЕВИЧ Евгений Игоревич, преподаватель кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0000-0003-3825-1094; e-mail: dashkevich_ei@mail.ru

ЮРЧЕНКО Роман Александрович, преподаватель кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0000-0003-0355-3295; e-mail: ray1981@yandex.ru

ГОЛОВЕНКО Владислав Романович, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам

Information about the authors

Vitaliy V. KRYMSKIY, Cand. Sci. (Econom.), Docent, Associate Professor of Department of Fire Fighting and Rescue Management, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8289-691X; e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Andrey B. BOYTSOV, Head of Fire Fighting Service of the Federal Fire Fighting Service of the State Fire Fighting Service of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in Saint Petersburg, nab. Moika River, 85, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-8258-6167; e-mail: andrey.boytsov.78@yandex.ru

Evgeniy I. DASHKEVICH, Lecturer, Department of Fire Fighting and Rescue Management, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3825-1094; e-mail: dashkevich_ei@mail.ru

Roman A. YURCHENKO, Lecturer, Department of Fire Fighting and Rescue Management, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0355-3295; e-mail: ray1981@yandex.ru

Vladislav R. GOLOVENKO, Postgraduate Student, 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

гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0000-0003-4187-281X; e-mail: golovenko.vlad@mail.ru

Вклад авторов:

Крымский В.В. — идея; научное редактирование текста.

Бойцов А.Б. — поиск информации; редактирование текста.

Дашкевич Е.И. — поиск информации; редактирование текста.

Юрченко Р.А. — работа с графическим материалом.

Головенко В.Р. — обработка материала; редактирование текста; оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4187-281X; e-mail: golovenko.vlad@mail.ru

Contribution of the authors:

Krymskiy V.V. — idea; scientific text editing.

Boytsov A.B. — information search; text editing.

Dashkevich E.I. — information search; text editing.

Yurchenko R.A. — working with graphic material.

Golovenko V.V. — material processing; text editing; and article design.

The authors declare no conflicts of interests.

Применение модели логистической регрессии при принятии решений по определению количества привлекаемых сил на ликвидацию лесных пожаров

Дмитрий Валерьевич Медведев , Александр Владимирович Матвеев, Алексей Сергеевич Смирнов

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, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Прогнозирование количества привлекаемых сил для ликвидации и локализации лесных пожаров является важной и актуальной задачей, оказывающей влияние на эффективность проводимых работ. Однако применение традиционных методов статистического прогнозирования не позволяет получить достоверную оценку целевого показателя в связи с отсутствием ряда признаков при анализе, следствием чего выступает снижение эффективности принимаемых решений.

Цель. Исследование возможности применения модели логистической регрессии для принятия решений о количестве привлекаемых сил на локализацию и ликвидацию лесных пожаров на начальной стадии пожара.

Методы исследования. Применение метода логистической регрессии оценивалось на основе базы данных о лесных пожарах на территории Ленинградской области в период с 2015 по 2023 г., в которой было выделено 16 признаков. Модель логистической регрессии позволяет обучаться на данных, имеющих различные виды распределения, среди которых биномиальное, пуассоновское, Бернулли и другие виды распределения. Математический аппарат, используемый в модели, позволяет оценить апостериорные вероятности для отнесения объектов обучения к соответствующим классам.

Результаты и их обсуждение. Представлены итоги оценки обучения модели в виде матриц ошибок и отчетов о классификации, выполнена визуализация границ решений для случаев использования двух и трех признаков. Результаты показали, что наилучшей точности удалось достичь при использовании всех доступных признаков.

Выводы. Исследование данных лесных пожаров на территории Ленинградской области показало, что присутствуют факторы, которые не учитываются при составлении планов привлечения сил и средств. Применение моделей машинного обучения и, в частности, логистической регрессии, предложенной в данном исследовании, позволяет повысить обоснованность и оперативность принимаемых решений по определению количества привлекаемых сил при лесных пожарах.

Ключевые слова: прогнозирование; машинное обучение; классификация; признаки; алгоритм обучения модели; метрики оценки качества модели; матрица ошибок

Для цитирования: Медведев Д.В., Матвеев А.В., Смирнов А.С. Применение модели логистической регрессии при принятии решений по определению количества привлекаемых сил на ликвидацию лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 84–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.84-96

 Медведев Дмитрий Валерьевич, e-mail: meedvedevdv@mail.ru

Application of a logistic regression model in decision-making on determining the number of forces involved in the elimination of forest fires

Dmitriy V. Medvedev , Alexandr V. Matveev, Alexey S. Smirnov

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, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Forecasting the number of involved forces for elimination and localization of forest fires is an important and urgent task that affects the efficiency of the work carried out. However, the use of traditional methods of statistical forecasting does not allow to obtain a reliable assessment of the target indicator, due to the lack of a number of features in the analysis, the consequence of which is a decrease in the effectiveness of decisions.

Objective. Investigation of the possibility of applying the logistic regression model to make decisions on the number of forces to be used for localization and suppression of forest fires at the initial stage of the fire.

Research methods. The application of the logistic regression method was evaluated on the basis of a database of forest fires in the territory of the Leningrad region in the period from 2015 to 2023, in which 16 features were identified. The logistic regression model allows training on data with different types of distribution, including binomial, Poisson, Bernoulli and other types of distribution. The mathematical apparatus used in the model allows us to estimate the posterior probabilities for assigning training objects to the appropriate classes.

Results. The results of the model training evaluation in the form of error matrices and classification reports are presented as results, and visualization of the decision boundaries for the cases of using two and three features is performed. The results show that the best accuracy was achieved using all available features.

Conclusion. The research of forest fires data in the Leningrad region has shown that there are factors that are not taken into account when making plans for the involvement of forces and resources. The use of machine learning models and, in particular, logistic regression, proposed in this study, can improve the validity and efficiency of decisions to determine the number of forces to be involved in forest fires.

Keywords: forecasting; machine learning; classification; signs; model training algorithm; metrics for assessing model quality; error matrix

For citation: Medvedev D.V., Matveev A.V., Smirnov A.S. Application of a logistic regression model in decision-making on determining the number of forces involved in the elimination of forest fires. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):84-96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.84-96 (rus).

✉ Dmitriy Valerevich Medvedev, e-mail: meedvedevdv@mail.ru

Введение

Для стран, где леса занимают большую территорию, лесные пожары являются важнейшей угрозой безопасности, потенциально приводящей к огромным ущербам экологии, экономике, а также могут представлять существенную опасность населенным пунктам. В случае реализации данной угрозы оперативному штабу необходимо в минимальные сроки принять решение о расчете привлекаемых сил и средств исходя из существующих планов тушения пожаров лесничеств, а также сводных планов [1]. В случае введения чрезвычайной ситуации или при угрозе населенным пунктам, объектам инфраструктуры к тушению лесных пожаров могут быть привлечены силы и средства МЧС России на основании существующего соглашения в соответствии с Постановлением Правительства РФ¹ и решением комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности.

При этом задача принятия решений по формированию и распределению привлекаемых сил на ликвидацию лесных пожаров в целом является сложной и плохо формализуемой и зачастую принимается в условиях неопределенности [2, 3]. Научное прогнозирование развития лесных пожаров на начальной фазе в целом может потенциально снизить степень неопределенности и обеспечить повышение адекват-

ности принимаемых решений [4, 5]. Развитие лесных пожаров зависит от множества факторов. Накопленная за последние годы статистическая информация о произошедших пожарах может потенциально снизить степень информационной неопределенности на начальном этапе принятия решений [6, 7], однако данные о лесных пожарах достаточно разрежены по причине отсутствия централизованной базы данных, а также неполноты учета факторов. Одним из возможных подходов в данном случае является применение методов машинного обучения, позволяющее компьютерным системам обучаться на основе больших массивов данных и делать на их основе прогнозы для обоснования управленческих решений, в частности при составлении планов привлечения сил и средств, определении условий соглашений с МЧС России для привлечения сил и средств при лесных пожарах. В ряде работ [8, 9] уже применялись методы машинного обучения на статистических данных о лесных пожарах для прогнозирования. По результатам исследования в работе [8] было выделено два метода машинного обучения, показавших наибольшую точность: это модель логистической регрессии и модель повышения градиента. Другие алгоритмы показали более низкие значения точности.

Авторы статьи [8] представили программное обеспечение «Firebird» для определения показателей пожарных рисков и представления соответствующих превентивных мероприятий. По результатам исследования авторы представили интерактивную карту пожарных рисков с возможностью внесения

¹ О привлечении сил и средств федеральных органов исполнительной власти для ликвидации чрезвычайных ситуаций в лесах, возникших вследствие лесных пожаров : Постановление Правительства РФ от 02.12.2017 № 1464.

изменений, базирующуюся на методе опорных векторов и случайного леса. Результаты модели, использующей метод случайного леса, показали более высокую точность, чем модель на опорных векторах. Однако полученные результаты оказались недостаточно точными для предсказания на основе этих моделей. Достичь повышения точности моделей возможно за счет предварительного индексирования показателей пожарного риска. Индексирование показателей осуществляется за счет привлечения группы экспертов, формирующих эвристическую модель. Индекс является мерой количественной оценки риска. Используя характерные для пожаров факторы, в модель вводятся переменные, на основании которых оценивается индекс и проводится анализ пожарного риска. В одной из работ [10] представлена модель по оценке вероятности появления селевого потока как следствия возникновения и развития пожара. В основе модели лежит сопряженная таблица, в которой представлены результаты трех подходов машинного обучения: логистической регрессии, случайных лесов, пороговых значений. Наибольшую точность показал метод случайных лесов.

Несмотря на существующие правила введения чрезвычайных ситуаций в лесах, а также привлечения сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций при реагировании на лесные пожары, существуют перспективы повышения обоснованности и оперативности принимаемых решений по определению количества привлекаемых сил и средств при лесных пожарах на основе применения технологий искусственного интеллекта, в частности моделей машинного обучения [11].

Целью настоящей работы является исследование возможности применения модели логистической регрессии для принятия решений о количестве привлекаемых сил на локализацию и ликвидацию лесных пожаров на начальной стадии пожара.

Методы исследования

Статистические данные выступают как основа для машинного обучения [12]. Статистика позволяет осуществлять проверку гипотез и представлять соответствующие оценки. Регрессия — один из методов моделирования и анализа в статистике, позволяющий выявить взаимосвязь между зависимой переменной и набором независимых переменных. В предложенной модели реализуется метод логистической регрессии с применением машинного обучения [13–15]. Существует ряд методов машинного обучения, которые основываются на статистических данных, позволяющих осуществлять классификацию, прогнозирование, кластерный анализ. Поэтому для оценки

количества привлекаемых сил будут предложены несколько вариантов реализации модели логистической регрессии для исследования точности получаемых результатов.

Логистическая регрессия — один из методов математического анализа данных, позволяющих выявить взаимосвязь между целевым признаком и независимыми переменными. Применение машинного обучения для реализации метода логистической регрессии основывается на прогнозировании вероятности наступления категориального события. Реализация данного подхода предполагает классификацию событий в тривиальном случае: 1 — характеризуется как успех, т.е. наступление события, 0 — как неудача. Машинное обучение позволяет осуществить учет необходимого количества факторов в модели без привлечения группы экспертов.

Основные преимущества метода логистической регрессии [16]:

- простота математической реализации при машинном обучении;
- требует меньших ресурсов вычислительной мощности по сравнению с другими методами;
- позволяет наглядно отобразить существующие зависимости между факторами.

Реализация логистической регрессии предполагает выполнение ряда этапов.

Этап 1. Сбор исходных данных

Данные были собраны из открытых источников ИСДМ-Рослесхоз по территории Ленинградской области в период с 2015 по 2023 г., а также использованы данные, предоставленные ГУ МЧС России по Ленинградской области, в которых было выделено 16 признаков (табл. 1) [17].

Этап 2. Предобработка исходных данных

Выделенные переменные возможно классифицировать по типу на две группы: числовые и категориальные.

Метод логистической регрессии в машинном обучении не принимает категориальные признаки в лингвистическом виде, для их кодировки предлагается принимать алгоритм One-hot-encoding [18]. Алгоритм заключается в замене возможных состояний признака на вектор из 0, 1, где 1 характеризуется как наличие данного состояния у признака, 0 — как отсутствие данного состояния. Например, для класса пожарной опасности, соответствующей 1-й категории, вектор будет представлен в следующем виде: 1, 0, 0, 0, 0.

Также важным элементом предобработки данных выступает их нормализация и регуляризация.

Нормализация данных — операция, направленная на исключение ошибок, связанных с раз-

Таблица 1. Переменные, включенные в модель оценки и прогнозирования
Table 1. Variables included in the estimation and forecasting model

Признак Feature	Наименование признака Name of the feature	Описание признака Description of the feature
x_1	Наименование лесничества The name of the forestry	Наименование участкового лесничества на территории Ленинградской области (например, Приозерское) The name of the district forestry in the Leningrad region (for example, Priozerskoye)
x_2	Широта пожара The latitude of the fire	Широта регистрации пожара (например, 58.665000) The latitude of fire registration (for example, 58.665000)
x_3	Долгота пожара The longitude of the fire	Долгота регистрации пожара (например, 30.091944) The longitude of the fire registration (for example, 30.091944)
x_4	Площадь при регистрации, кв. м The area at registration, sq. m	Площадь пожара в момент регистрации (например, 25,0) The area of the fire at the time of registration (for example, 25.0)
x_5	Площадь, пройденная огнем в субъекте РФ, кв. м The area covered by fire in the subject of the Russian Federation, sq. m	Площадь, пройденная огнем в субъекте РФ, без учета площади при регистрации (например, 20,0) The area covered by fire in the subject of the Russian Federation, excluding the area during registration (for example, 20.0)
x_6	Температура воздуха, °C Air temperature, °C	Температура воздуха в градусах Цельсия, измеренная на 9 ч местного времени с ближайшей метеостанции к указанному месту пожара (например, +8,1) The air temperature in degrees Celsius, measured at 9 o'clock local time from the nearest weather station to the specified fire location (for example, +8.1)
x_7	Точка росы, °C Dew point, °C	Точка росы в градусах Цельсия, измеренная на 9 ч местного времени с ближайшей метеостанции к указанному месту пожара (например, +3,0) The dew point in degrees Celsius, measured at 9 o'clock local time from the nearest weather station to the specified fire location (for example, +3.0)
x_8	Суточные осадки, мм Daily precipitation, mm	Суточные осадки в мм, измеренные на 9 ч местного времени с ближайшей метеостанции к указанному месту пожара (например, 33) Daily precipitation in mm, measured at 9 o'clock local time from the nearest weather station to the specified fire (for example, 33)
x_9	Значения показателя класса пожарной природной опасности Values of the fire hazard class indicator	Класс пожарной природной опасности на основе влажности почвенного покрова, рассчитываемый в соответствии с методиками расчета класса пожарной природной опасности, критерием для сброса или понижения класса пожарной природной опасности на утро текущего дня является количество суточных осадков на 9 ч утра местного времени (осадки за вчерашний день + ночь) (например, 1463) The class of fire natural hazard based on the moisture content of the ground cover, calculated in accordance with the methods of calculating the class of fire natural hazard, the criterion for dumping or lowering the class of fire natural hazard in the morning of the current day is the amount of daily precipitation for 9 am local time in the morning (precipitation for yesterday + night), (for example, 1,463)
x_{10}	Класс пожарной опасности Fire hazard class	Класс пожарной опасности в соответствии со значением признака показателя класса пожарной природной опасности (например, 3) Fire hazard class according to the value of the attribute, the value of the fire hazard class indicator (for example, 3)
x_{11}	Расстояние до пожарной части, м The distance to the fire station, m	Евклидово расстояние от точки регистрации пожара до координат ближайшей пожарной части (например, 1500) The Euclidean distance from the fire registration point to the coordinates of the nearest fire station (for example, 1,500)
x_{12}	Широта пожарной части The latitude of the fire station	Широта расположения пожарной части (например, 58.738500) The latitude of the location of the fire station (for example, 58.738500)
x_{13}	Долгота пожарной части The longitude of the fire station	Долгота расположения пожарной части (например, 29.849600) The longitude of the location of the fire station (for example, 29.849600)

Признак Feature	Наименование признака Name of the feature	Описание признака Description of the feature
x_{14}	Количество сил пожарной части, чел. The number of fire department forces, people	Количество сил, находящихся в боевом расчете пожарной части (например, 15) The number of forces in the combat calculation of the fire department (for example, 15)
x_{15}	Количество техники пожарной части The number of fire department equipment	Количество техники, находящейся в боевом расчете пожарной части (например, 3) The number of vehicles in the combat calculation of the fire department (for example, 3)
x_{16}	Количество пожарно-технического вооружения пожарной части The number of fire-technical weapons of the fire department	Количество пожарно-технического вооружения, находящегося в боевом расчете пожарной части (например, 8) The number of fire-technical weapons in the combat calculation of the fire department (for example, 8)

личным физическим смыслом признаков, а также их масштабом. Нормализация позволяет привести признаки к единому масштабу значений, что приведет к более эффективной обработке модели. Одним из методов нормализации является использование математического ожидания и дисперсии.

Регуляризация данных — операция, направленная на уменьшение абсолютных значений весов по каждому из признаков. В случае, если модель обладает свойством мультиколлинеарности, то решений становится бесконечно много, так как веса признаков могут принимать континуальное множество решений [19]. Следствием чего выступает переобучение модели, выявление слишком сложных зависимостей. Предлагается 3 подхода к регуляризации весов: l_1 — регуляризация (LASSO), l_2 — регуляризация (Ridge), Elastic net — комбинация l_1 и l_2 [20].

l_1 — регуляризация штрафует модель на сумму модулей всех весов, так как функция модуля не дифференцируема в нуле, это накладывает ограничения в виде возможного зануления весов для некоторых признаков, а также отсутствия аналитического решения.

l_2 — регуляризация штрафует модель на сумму квадратов ее весов, квадратичная функция является дифференцируемой, что позволяет получить аналитическое решение.

Этап 3. Обучение модели

Данный этап предполагает проведение обучения модели логистической регрессии на обучающем наборе с целью получения оценок по выбранным метрикам для первичной оценки качества модели. В случае получения неудовлетворительных результатов необходимо вернуться на предыдущие этапы для корректировки данных.

Этап 4. Апробирование модели на тестовом наборе данных

Данный этап позволяет на обученной модели провести оценку согласно метрикам на отложенном наборе данных. В результате оценки принимается решение об удовлетворительности применяемой модели для целевой переменной. В случае получения неудовлетворительных результатов предполагается вернуться на предыдущий этап для корректировки гиперпараметров модели.

Теоретические основы

Признаки, используемые в модели, основываются на исходном наборе предобработанных данных, для которых возможно применение методов статистического машинного обучения. Распределение вероятностей пожароопасной ситуации носит дискретный характер, для представления которых возможно использовать биномиальное, пуассоновское, Бернулли и иные виды распределения. Для понимания работы алгоритма рассмотрим биномиальный закон распределения, для которого характерна определенная степень постоянства вероятности. Согласно закону биномиального распределения, случайная величина Y определяется как:

$$P(Y = y) = \binom{n}{y} \cdot p^y \cdot (1 - p)^{n-y}, \quad y = 0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

где Y — случайная величина;

n — число испытаний;

p — вероятность наступления события.

Математическое ожидание биномиального закона распределения определяется как произведение общего числа испытаний на вероятность наступления события $M(Y) = np$, среднеквадратичное отклонение определяется как: $\sigma = \sqrt{np(1-p)}$. В простейшем случае целевая переменная может иметь бинарное представ-

ление, определяющее: 0 — силы не привлекаются, 1 — силы привлекаются. Таким образом, логит-модель регрессии будет представлена как:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (2)$$

где $\log(p/1-p)$ — логистическая функция;

p — вероятность привлечения сил;

β_i — коэффициенты, отражающие влияние переменных на результат прогностической модели;

x_i — независимые переменные, характеризующие объект;

ε — аддитивная случайная ошибка, имеющая стандартное логистическое распределение. Возведя в степень в обе части логит-модели, возможно перейти к следующей форме представления модели:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}}, \quad (3)$$

где β_i — оценка коэффициентов модели при условии, что e стремится к минимуму.

Определение коэффициентов логистической регрессии на практике зачастую реализуют методом максимального правдоподобия. В основе метода лежит функция правдоподобия, характеризующая плотность вероятности целевой переменной по выборке. Задачей является поиск параметров модели, при которых заданная функция правдоподобия принимает максимальное значение. На практике максимизируют не саму функцию, а натуральный логарифм функции правдоподобия, так как максимум в обоих случаях достигается при равных значениях искомых параметров.

Пусть P_i — вероятность наступления ожидаемого события, т.е. “1”, тогда:

$$P_i = \text{Prob}(Y_i = 1). \quad (4)$$

Значение вероятности зависит от $x_i w$, где x_i — строка матрицы независимых переменных, w — вектор коэффициентов регрессии.

Таким образом, функция правдоподобия будет равна:

$$\begin{aligned} L^* &= \sum_{i \in I_1} \ln P_i(x_i) + \sum_{i \in I_0} \ln(1 - P_i(x_i)) = \\ &= \sum_{i=1}^k (Y_i \cdot \ln P_i(x_i) + (1 - Y_i) \cdot \ln(1 - P_i(x_i))), \end{aligned} \quad (5)$$

где I_0, I_1 — множество исходных данных, для которых $Y_i = 0, I_i = 1$ соответственно.

Основным отличием логистической регрессии от линейной регрессии является вид предсказания результата, который является вероятностной функ-

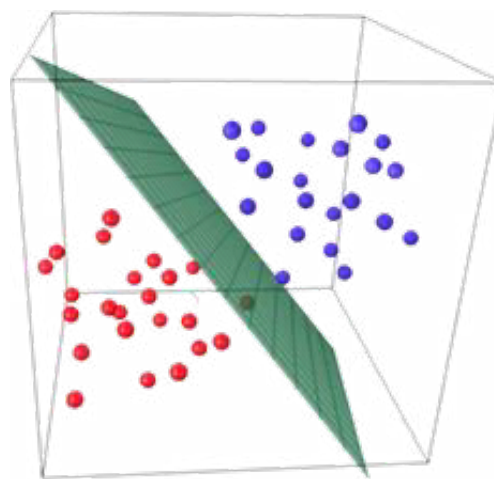


Рис. 1. Разделяющая граница классов для модели логистической регрессии при двух переменных

Fig. 1. Dividing class boundary for a logistic regression model with two variables

цией принадлежности к заданным классам. Результат логистической регрессии находится в интервале 0; 1. Вся область исходных данных разделяется границей, разделяющей классы. В тривиальном случае для одной независимой переменной разделяющей границей является прямая, в случае двух переменных — плоскость (рис. 1), для более сложных случаев — гиперплоскость.

Разделяющая плоскость на рис. 1 является линейным дискриминантом, так как является линейной по отношению к построенной функции.

Логит-модель регрессии может быть реализована с применением нейронных сетей и применяться для оценки и прогнозирования пожароопасных ситуаций (рис. 2). Исходными данными для реализации будет выступать кортеж переменных (Y, X_i) , весами нейронной сети — коэффициенты логистической регрессии. При реализации модели машинного обу-

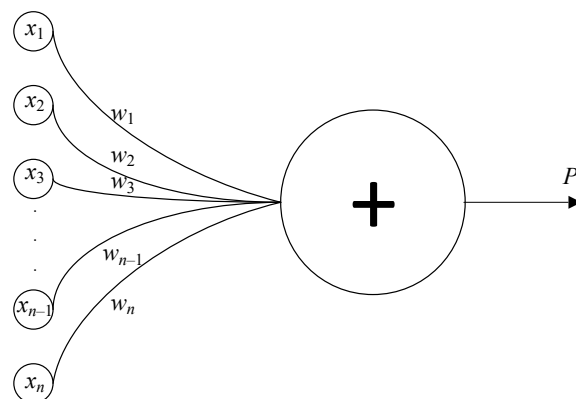


Рис. 2. Логистическая регрессия в структурном виде нейронной сети

Fig. 2. Logistic regression in the structural form of a neural network

Таблица 2. Оценка качества классификации
Table 2. Classification quality assessment

Модель Model	Фактически положительные Actually positive	Фактически отрицательные Actually negative
Положительные Positive	TP	FP
Отрицательные Negative	FN	TN

TP — true positive, правильно классифицированные ожидаемые события.

TN — true negatives, правильно классифицированные не ожидаемые события.

FN — false negatives, неправильно классифицированные ожидаемые события.

FP — false positive, неправильно классифицированные не ожидаемые события.

TP — true positive, correctly classified expected events.

TN — true negatives, correctly classified unexpected events.

FN — false negatives, incorrectly classified expected events.

FP — false positive, incorrectly classified unexpected events.

чения результатом может являться 0 (силы не привлекаются) и 1 (силы привлекаются).

Оценку качества модели логистической регрессии предлагается осуществить с помощью стандартных метрик библиотеки Sklearn языка программирования Python. Также достаточно часто используется ROC-кривая для оценки результатов, характеризующая взаимосвязь между количеством правильно классифицированных ожидаемых событий (т.е. 1) и количеством неправильно классифицированных неожиданных событий (т.е. 0). Данные, характеризующие варианты классификации набора данных, представлены в табл. 2 [10, 21].

На основании этих показателей определяются значения двух критериев для оценки: точность (отражающая специфичность модели) и полнота (отражающая чувствительность модели).

Точность (S_p) — число правильно классифицированных ожидаемых событий к общему числу классификаций ожидаемых событий:

$$S_p = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (6)$$

Полнота (S_{recall}) — число правильно классифицированных ожидаемых событий к общему числу элементов данного класса (фактически положительных):

$$S_{recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (7)$$

Таким образом, высокое значение показателя S_{recall} представляет верный результат при наличии ожидаемых событий (обнаруживает ожидаемые события).

В процессе подготовки данных для машинного обучения необходимо разделить набор на две составляющие: обучающий и тестовый. Для реализации был использован язык программирования Python.

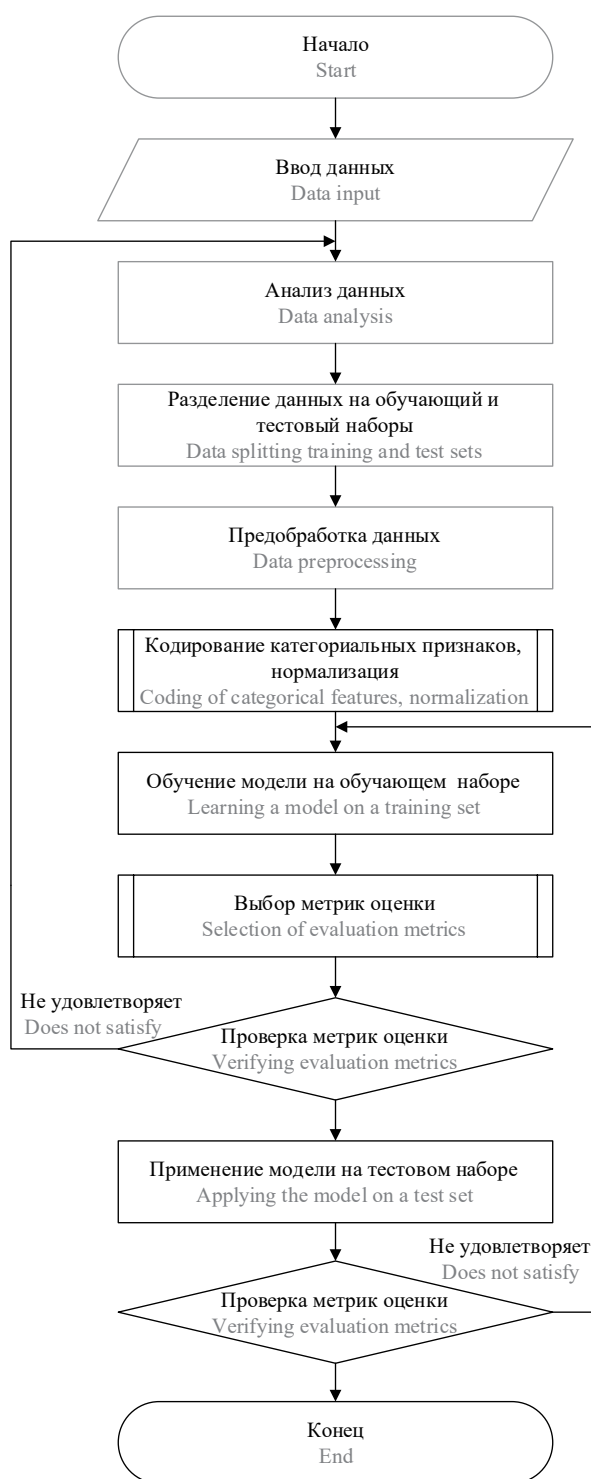


Рис. 3. Блок-схема алгоритма логистической регрессии
Fig. 3. Block diagram of the logistic regression algorithm

Блок-схема алгоритма логистической регрессии представлена на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Поиск наилучших параметров для модели логистической регрессии осуществлялся по сетке с помощью встроенного в библиотеку Sklearn модуля GridSearchCV, в качестве метрики для оценки исполь-

зовался отчет о классификации и матрица ошибок. База данных содержала 376 объектов, на которых необходимо провести обучение и оценку.

Целевая переменная была разделена на три класса по количеству привлеченных сил: не более 10 человек — 1; от 10 до 24 человек — 2; более 24 человек — 0.

На рис. 4 представлена гистограмма распределения количества экземпляров каждого из классов целевой переменной.

Так как исходные данные имеют незначительное количество экземпляров миноритарного класса, было проведено синтетическое увеличение числа объектов данного класса с использованием алгоритма RandomOverSampler библиотеки imblearn [22]. В результате балансировки распределения объектов по подклассам получилось 732 экземпляра.

Количество независимых переменных (в данном случае 16) не позволяет визуализировать результаты классификации, поэтому было принято решение применить метод главных компонент для уменьшения размерности до 2 и 3 признаков. На рис. 5 и 6 представлены границы решений классификации при

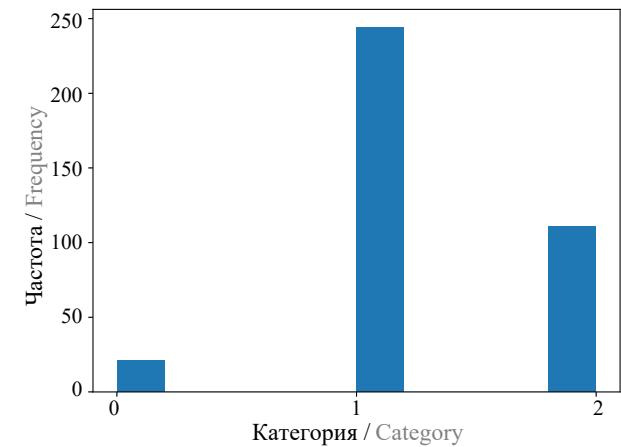


Рис. 4. Гистограмма распределения экземпляров по классам
Fig. 4. Histogram of distribution of specimens by classes

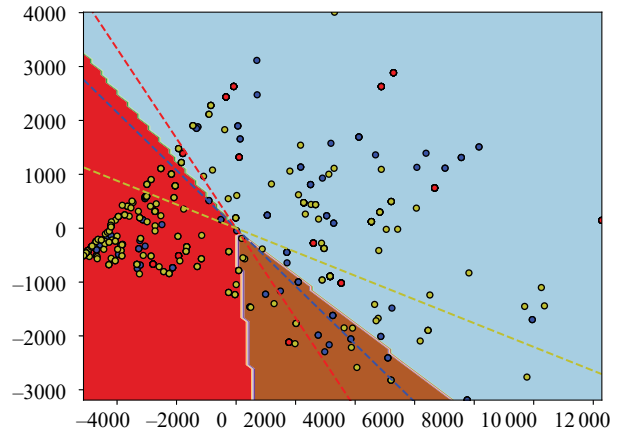


Рис. 5. Границы решений для схемы ovr
Fig. 5. Decision boundary of LogisticRegression with ovr

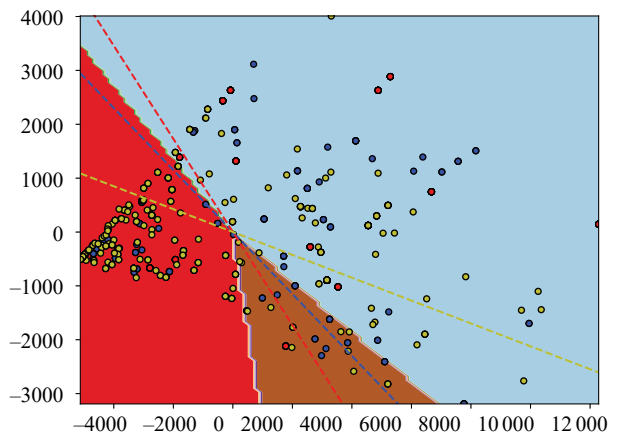


Рис. 6. Границы решений для схемы multinomial
Fig. 6. Decision boundary of Logistic Regression with multinomial

уменьшении размерности до 2 признаков для схемы классификации «один класс против остальных (ovr)» и схемы, использующей перекрестную энтропийную потерю (multinomial) соответственно. Отчет о результатах классификации представлен в табл. 3.

На рис. 7 приведена визуализация решений классификации при уменьшении размерности до 3

Таблица 3. Отчет о результатах классификации при использовании 2 признаков
Table 3. Report on classification results using 2 features

Классы Classes	Метрики Metrics			
	Отчет о классификации Classification Report is			
	Точность Accuracy	Полнота Fullness	f1-оценка f1-score	Количество объектов класса Number of class objects
0	0,52	0,71	0,60	244
1	0,47	0,68	0,55	244
2	0,43	0,08	0,13	244
Точность Accuracy	Не измеряется Not measured	Не измеряется Not measured	0,49	732
Макро-усреднение Macro averaging	0,47	0,49	0,43	723
Микро-усреднение Micro averaging	0,47	0,49	0,43	723

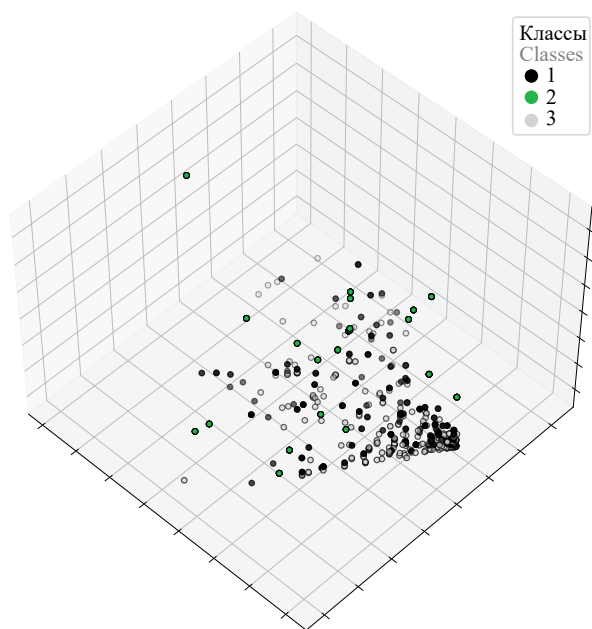


Рис. 7. Визуализация решений классификации при использовании 3 признаков
Fig. 7. Visualization of classification decisions using 3 features

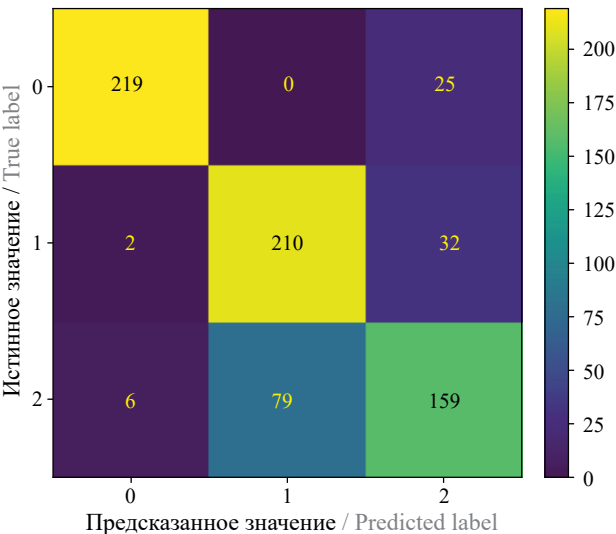


Рис. 8. Матрица ошибок классификации при использовании 3 признаков
Fig. 8. Classification error matrix when using 3 features

признаков. На рис. 8 представлена матрица ошибок при использовании 3 признаков. Отчет о результатах классификации представлен в табл. 4.

На рис. 9 представлена матрица ошибок при использовании всех признаков. Отчет о результатах классификации представлен в табл. 5.

Таким образом, уменьшение размерности позволило визуализировать полученные результаты классификации, однако при использовании двух признаков точность классификации оказалась самой низкой, а в случае использования трех признаков результат достаточно близок к случаю, при котором использовались все доступные для анализа признаки.

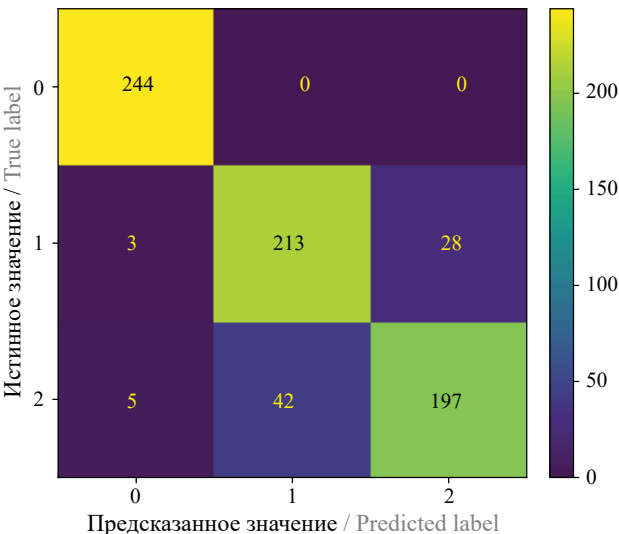


Рис. 9. Матрица ошибок классификации при использовании всех признаков
Fig. 9. Matrix of classification errors when using all the features

Таблица 4. Отчет о результатах классификации при использовании 3 признаков
Table 4. Report on classification results using 3 features

Классы Classes	Метрики Metrics			
	Отчет о классификации Classification report			
	Точность Accuracy	Полнота Fullness	f1- оценка f1-score	Количество объектов класса Number of class objects
0	0,96	0,90	93	244
1	0,73	0,86	0,79	244
2	0,74	0,65	0,69	244
Точность Accuracy	Не изме- ряется Not measured	Не изме- ряется Not measured	0,80	732
Макро- усреднение Macro averaging	0,1	0,80	0,80	723
Микро- усреднение Micro averaging	0,81	0,80	0,80	723

Таблица 5. Отчет о результатах классификации при использовании всех признаков

Table 5. Report on the classification results using all the features

Классы Classes	Метрики Metrics			
	Отчет о классификации Classification report			
	Точность Accuracy	Полнота Fullness	f1- оценка f1-score	Коли- чество объектов класса Number of class objects
0	0,97	1,00	0,98	244
1	0,84	0,87	0,85	244
2	0,88	0,81	0,84	244
Точность Accuracy	Не изме- ряется Not measured	Не изме- ряется Not measured	0,89	732
Макро- усреднение Macro averaging	0,89	0,89	0,89	723
Микро- усреднение Micro averaging	0,81	0,89	0,89	723

Выводы

Уровень существующих угроз и значимость возможных последствий лесных пожаров актуализируют необходимость оперативной и достоверной оценки возможного развития ситуации с целью выработки адекватных управленческих решений.

В статье на основе использования данных о 16 первичных признаках, собранных на территории Ленинградской области за период с 2015 по 2023 г., исследованы возможности применения модели логистической регрессии для определения количества привлекаемых сил и средств МЧС России на ликвидацию лесных пожаров.

Результат реализации модели логистической регрессии показали наилучшие результаты по используемым метрикам в случае, когда использовались все доступные признаки, что подтверждает гипотезу о необходимости учета множества факторов при принятии решений при лесных пожарах. Однако существенным недостатком является отсутствие возможности визуализации полученных результатов, что затрудняет процесс принятия решения ответственными лицами.

Применение моделей машинного обучения и, в частности, логистической регрессии, предложенной в данном исследовании, позволяет повысить обоснованность и оперативность принимаемых решений по определению количества привлекаемых сил при лесных пожарах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вилков В.Б., Горшкова Е.Е., Черных А.К. Решение задачи нахождения оптимального маршрута патрулирования действующих лесных пожаров в заданном районе // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 3. С. 90–98. EDN ZYOYFF.

2. Молчанов А.В. Концептуальная модель формирования рационального состава группировки сил различной ведомственной принадлежности при ликвидации чрезвычайных ситуаций в лесах регионального характера, возникших вследствие лесных пожаров // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4 (27). С. 95–102. EDN VCITFJ.

3. Карапузиков А.А., Дьяков В.Ф., Кокишаров А.В., Дьяков М.В., Ставриниди С.Ю., Белкин Д.С. К вопросу об управлении силами и средствами при тушении лесных пожаров // Техносферная безопасность. 2020. № 2 (27). С. 16–27. EDN URZSEG.

4. Матвеев А.В., Богданова Е.М. Классификация методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2018. № 4 (24). С. 61–70. EDN YTPZYL.

5. Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 1 (379). С. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34. EDN YTFJYI.

6. Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 111–120. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120. EDN YGGSLR.

7. Матвеев А.В., Матиев Р.Т. Принятие решений при пожарах в горной местности : сравнительный анализ методов мониторинга // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2023. № 2 (42). С. 76–90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90. EDN QPRUWC.

8. Madaio M., Chen S.T., Haimson O., Zhang W., Cheng X., Hinds-Aldrich M. et al. Firebird: Predicting fire risk and prioritizing fire inspections in Atlanta // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. Pp. 185–194. DOI: 10.1145/2939672.2939682
9. Nikolopoulos E.I., Destro E., Bhuiyan M., Borga M., Anagnostou E. Evaluation of predictive models for post-fire debris flow occurrence in the western United States // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. Vol. 18. No. 9. Pp. 2331–2343. DOI: 10.5194/nhess-18-2331-2018
10. Pham B.T., Jaafari A., Avand M., Al-Ansari N., Dinh Du T., Yen H.P. et al. Performance evaluation of machine learning methods for forest fire modeling and prediction // Symmetry. 2020. Vol. 12. No. 6. P. 1022. DOI: 10.3390/sym12061022
11. Максимов А.В. Методы поддержки принятия решений в оперативном управлении при чрезвычайных ситуациях: обзор исследований // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2023. № 2 (42). С. 91–102. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102. EDN CJCPWN.
12. Бутырский Е.Ю., Мамвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. СПб. : Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book_011222. EDN CCRIRT.
13. Ray S. A quick review of machine learning algorithms // 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon). IEEE, 2019. Pp. 35–39. DOI: 10.1109/COMITCon.2019.8862451
14. Abid F. A survey of machine learning algorithms based forest fires prediction and detection systems // Fire technology. 2021. Vol. 57. No. 2. Pp. 559–590. DOI: 10.1007/s10694-020-01056-z
15. Sayad Y.O., Mousannif H., Al Moatassime H. Predictive modeling of wildfires: A new dataset and machine learning approach // Fire safety journal. 2019. Vol. 104. Pp. 130–146. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.01.006
16. Yang Y., Loog M. A benchmark and comparison of active learning for logistic regression // Pattern Recognition. 2018. Vol. 83. Pp. 401–415. DOI: 10.1016/j.patcog.2018.06.004
17. Медведев Д.В. Модель прогнозирования лесных пожаров на основе нейро-нечеткой системы ANFIS // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 4. С. 185–198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198. EDN MXLKBI.
18. Karthiga R., Usha G., Raju N., Narasimhan K. Transfer learning based breast cancer classification using one-hot encoding technique // 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). IEEE, 2021. Pp. 115–120. DOI: 10.1109/ICAIS50930.2021.9395930
19. Salehi F., Abbasi E., Hassibi B. The impact of regularization on high-dimensional logistic regression // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. Vol. 32.
20. Liang X., Jacobucci R. Regularized structural equation modeling to detect measurement bias: Evaluation of lasso, adaptive lasso, and elastic net // Structural Equation Modeling : a Multidisciplinary Journal. 2020. Vol. 27. No. 5. Pp. 722–734. DOI: 10.1080/10705511.2019.1693273
21. Molotisev M.D., Sineva I.S. Classification algorithms analysis in the forest fire detection problem // 2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). IEEE, 2019. Pp. 548–553. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928398
22. Hayaty M., Muthmainah S., Ghufuran S.M. Random and synthetic over-sampling approach to resolve data imbalance in classification // International Journal of Artificial Intelligence Research. 2020. Vol. 4. No. 2. Pp. 86–94. DOI: 10.29099/ijair.v4i2.152

REFERENCES

1. Vilkov V.B., Gorshkova E.E., Chernykh A.K. Solving the problem of finding the optimal route for patrolling active forest fires in a given area. *Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”*. 2021; 3:90-98. EDN ZYOYFF. (rus).
2. Molchanov A.V. Conceptual model of formation of rational structure of group of forces of various departmental accessory, at elimination of emergency situations in the woods of regional character which arose owing to forest fires. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2015; 4(27):95-102. EDN VCITFJ. (rus).
3. Karapuzikov A.A., Dyakov V.F., Koksharov A.V., Dyakov M.V., Stavrini S.Y., Belkin D.S. On the issue of managing forces and means for extinguishing forest fires. *Technospheric Safety*. 2020; 2(27):16-27. EDN URZSEG. (rus).
4. Matveev A.V., Bogdanova E.M. The classification for the methods of prediction emergency situations. *National Security and Strategic Planning*. 2018; 4(24):61-70. EDN YTPZYL. (rus).
5. Stankevich T.S. Forecasting the spatial behavior of a forest fire at uncertainty and instability of the process. *News of Higher Educational Institutions. Forest Magazine*. 2021; 1(379):20-34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34. (rus).

6. Stankevich T.S. Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(9):111-120. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120 (rus).
7. Matveev A.V., Matiev R.T. Decision-making during fires in mountainous areas : a comparative analysis of monitoring methods. *National Security and Strategic Planning*. 2023; 2(42):76-90. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-76-90 (rus).
8. Madaio M., Chen S.T., Haimson O., Zhang W., Cheng X., Hinds-Aldrich M. et al. Firebird: Predicting fire risk and prioritizing fire inspections in Atlanta. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016; 185-194. DOI: 10.1145/2939672.2939682
9. Nikolopoulos E.I., Destro E., Bhuiyan M., Borga M., Anagnostou E. Evaluation of predictive models for post-fire debris flow occurrence in the western United States. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018; 18(9):2331-2343. DOI: 10.5194/nhess-18-2331-2018
10. Pham B.T., Jaafari A., Avand M., Al-Ansari N., Dinh Du T., Yen H.P. et al. Performance evaluation of machine learning methods for forest fire modeling and prediction. *Symmetry*. 2020; 12(6):1022. DOI: 10.3390/sym12061022
11. Maximov A.V. Decision support methods in emergency management: a review of research. *National Security and Strategic Planning*. 2023; 2(42):91-102. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102 (rus).
12. Butyrsky E.Yu., Matveev A.V. *Mathematical modeling of systems and processes*. 2022; 733. DOI 10.37468/book_011222 (rus).
13. Ray S. A quick review of machine learning algorithms. *2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon)*. 2019; 35-39. DOI: 10.1109/COMITCon.2019.8862451
14. Abid F. A survey of machine learning algorithms based forest fires prediction and detection systems. *Fire Technology*. 2021; 57(2):559-590. DOI: 10.1007/s10694-020-01056-z
15. Sayad Y.O., Mousannif H., Al Moatassime H. Predictive modeling of wildfires: A new dataset and machine learning approach. *Fire Safety Journal*. 2019; 104:130-146. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.01.006
16. Yang Y., Loog M. A benchmark and comparison of active learning for logistic regression. *Pattern Recognition*. 2018; 83:401-415. DOI: 10.1016/j.patcog.2018.06.004
17. Medvedev D.V. Implementation of the ANFIS neuro-fuzzy system for forest fire management. *Scientific and Analytical Journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2023; 4:185-198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198 (rus).
18. Karthiga R., Usha G., Raju N., Narasimhan K. Transfer learning based breast cancer classification using one-hot encoding technique. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. 2021; 115-120. DOI: 10.1109/ICAIS50930.2021.9395930
19. Salehi F., Abbasi E., Hassibi B. The impact of regularization on high-dimensional logistic regression. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019; 32.
20. Liang X., Jacobucci R. Regularized structural equation modeling to detect measurement bias: Evaluation of lasso, adaptive lasso, and elastic net. *Structural Equation Modeling : a Multidisciplinary Journal*. 2020; 27(5):722-734. DOI: 10.1080/10705511.2019.1693273
21. Molovtsev M.D., Sineva I.S. Classification algorithms analysis in the forest fire detection problem. *2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE, 2019; 548-553. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928398
22. Hayaty M., Muthmainah S., Ghufuran S.M. Random and synthetic over-sampling approach to resolve data imbalance in classification. *International Journal of Artificial Intelligence Research*. 2020; 4(2):86-94. DOI: 10.29099/ijair.v4i2.152

Поступила 11.05.2024, после доработки 12.06.2024;

принята к публикации 28.06.2024

Received May 11, 2024; Received in revised form June 12, 2024;

Accepted June 28, 2024

Информация об авторах

МЕДВЕДЕВ Дмитрий Валерьевич, адъюнкт, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; SPIN-код: 8464-6705; Scopus AuthorID: 57197819511; ORCID: 0009-0002-9436-4376; e-mail: meedvedevdv@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy V. MEDVEDEV, Graduate, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; SPIN-code: 8464-6705; Scopus AuthorID: 57197819511; ORCID: 0009-0002-9436-4376; e-mail: meedvedevdv@mail.ru

МАТВЕЕВ Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информационных технологий, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; SPIN-код: 5778-8832; Scopus AuthorID: 57197819511; ORCID: 0000-0002-0778-3218; e-mail: fcvega_10@mail.ru

СМИРНОВ Алексей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель начальника, 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, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; SPIN-код: 1677-1402; ORCID: 0000-0003-1661-9089; e-mail: sas@igps.ru

Вклад авторов:

Медведев Д.В. — сбор материала; разработка методики и проведение эксперимента; получение, обработка и анализ экспериментальных данных; написание статьи.

Матвеев А.В. — сбор материала; разработка методики и проведение эксперимента; написание статьи; научное редактирование текста.

Смирнов А.С. — идея; научное редактирование текста. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Alexander V. MATVEEV, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Department of Applied Mathematics and Information Technologies, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; SPIN-code: 5778-8832; Scopus AuthorID: 57197819511; ORCID: 0000-0002-0778-3218; e-mail: fcvega_10@mail.ru

Alexey S. SMIRNOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy Head, 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, Moskovskiy Ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; SPIN-code: 1677-1402; ORCID: 0000-0003-1661-9089; e-mail: sas@igps.ru

Contribution of the authors:

Medvedev D.V. — collection of material; development of methodology and experiment; acquisition, processing and analysis of experimental data; writing of article.

Matveev A.V. — collection of material; development of methodology and experiment; acquisition; writing of article; scientific editing of the text.

Smirnov A.S. — idea; scientific editing of the text. The authors declare that there is no conflict of interest.

Перспективы применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов

Ринат Валерьевич Халиков¹✉, Владимир Васильевич Роенко¹,
Ильдар Рафатович Бегишев¹, Татьяна Николаевна Халикова¹,
Антон Дмитриевич Корольченко²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных проблем системы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики является предотвращение пожаров горючих газов. Анализ существующих систем предотвращения пожаров показал низкую эффективность их работы. Для предотвращения пожаров горючих газов в рамках настоящей работы предлагается использование водной среды в метастабильном фазовом состоянии.

Цель. Исследование особенностей водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах.

Задачи. Анализ существующих средств системы предотвращения пожаров газов. Обоснование расчетами возможности применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах. Моделирование процесса флегматизации метана в замкнутом объеме водной средой в метастабильном фазовом состоянии и определение оптимальных параметров ее подачи.

Методика исследования. Определение необходимости применения нового средства предотвращения пожаров газов на объектах энергетики было обосновано с использованием метода анализа и синтеза. Для обоснования возможности предотвращения пожаров метана в замкнутом объеме было применено математическое моделирование на базе программно-аппаратного комплекса Pyrosim.

Теоретические основы. Для расчета минимальной флегматизирующей концентрации был применен закон Гесса и теория разветленно-цепных процессов горения.

Результаты и обсуждение. На основании проведенных расчетов было установлено количество технических средств подачи для различной степени негерметичности помещения. Требуемое количество стволов линейно зависит от объема помещения. Стоит отметить, что при достижении определенного коэффициента негерметичности, что будет соответствовать подаче водной среды в метастабильном фазовом состоянии в открытое пространство, количество стволов будет принимать максимальное значение для данного объема. Математическим моделированием было определено, что целесообразно устанавливать устройства подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии на боковых поверхностях, а достижение флегматизирующих концентраций наступает в течение 10 сек с момента подачи.

Выводы. Методом анализа установлено, что существующие системы предотвращения пожара недостаточно эффективны, так как в некоторых случаях могут привести к появлению локального возгорания. Предложен и теоретически обоснован способ предотвращения пожаров горючих газов водной средой в метастабильном фазовом состоянии в замкнутых объемах на объектах энергетики. Произведен расчет необходимого количества технических средств подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии в зависимости от объема помещения и коэффициента негерметичности. Применение программно-аппаратного комплекса Pyrosim подтвердило правильность выполненных расчетов и позволило установить оптимальный способ подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии в объем машинного зала теплоэлектростанции.

Ключевые слова: утечка газа; флегматизация горения; безопасность объектов энергетики; объемное пожаротушение; моделирование

Для цитирования: Халиков Р.В., Роенко В.В., Бегишев И.Р., Халикова Т.Н., Корольченко А.Д. Перспективы применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 97–107. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.97-107

✉ Халиков Ринат Валерьевич, e-mail: vokilah@rambler.ru

Prospects of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires

Rinat V. Khalikov¹✉, Vladimir V. Roenko¹, Ildar R. Begishev¹, Tatyana N. Khalikova¹, Anton D. Korolchenko²

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the main problems of the fire safety system of energy facilities is the prevention of combustible gas fires. An analysis of existing fire prevention systems showed low efficiency of their operation. In order to prevent combustible gas fires, the use of an aqueous medium in a metastable phase state is proposed in this work.

Purpose. Investigation of the characteristics of an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires in closed volumes.

Objectives. An analysis of existing means of the gas fire prevention system. The calculations substantiate the possibility of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent fires of flammable gases in closed volumes. Modelling the process of phlegmatization of methane in a closed volume by an aqueous medium in a metastable phase state and determining the optimal parameters of its supply.

Materials and methods. The determination of the need to use a new means of preventing gas fires at energy facilities was justified using the method of analysis and synthesis. To substantiate the possibility of preventing methane fires in a closed volume, mathematical modelling based on the Pyrosim hardware and software complex was applied.

Theoretical bases. To calculate the minimum phlegmatizing concentration, Hess's law and the theory of branched-chain combustion processes were applied.

Results and discussions. Based on the calculations performed, the number of technical means of supply for different degrees of room leakage was established. The required number of barrels depends linearly on the volume of the room. It is worth noting that when a certain leakage coefficient is reached, which will correspond to the supply of an aqueous medium in a metastable phase state to an open space, the number of barrels will take the maximum value for a given volume. Mathematical modelling has established that it is advisable to install devices for feeding an aqueous medium in a metastable phase state on the side surfaces, and the achievement of phlegmatizing concentrations occurs within 10 seconds from the moment of feeding.

Conclusions. The analysis method has established that the existing fire prevention systems are not effective enough, since in some cases they can cause a fire. A method for preventing fires of combustible gases by aqueous medium in a metastable phase state in closed volumes at energy facilities is proposed and theoretically substantiated. The calculation of the required number of technical means of supplying an aqueous medium in a metastable phase state, depending on the volume of the room and the leak coefficient, is performed. The use of the Pyrosim software and hardware complex confirmed the correctness of the calculations performed and allowed to establish the optimal method of supplying an aqueous medium in a metastable phase state to the volume of the engine room of the thermal power plant.

Keywords: gas leakage; thermal phlegmatization; safety of energy facilities; volumetric firefighting; modelling

For citation: Khalikov R.V., Roenko V.V., Begishev I.R., Khalikova T.N., Korolchenko A.D. Prospects of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):97-107. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.97-107 (rus).

✉ Rinat Valerievich Khalikov, e-mail: vokilah@rambler.ru

Введение

Топливо-энергетический комплекс является одной из важнейших составляющих экономического развития Российской Федерации. При этом от надежности и бесперебойности систем газораспределения зависит стабильность работы объектов топливо-энергетического комплекса, обеспечивающих население электроэнергией, горячим водоснабжением и отоплением жилых и производственных помещений [1–5].

По состоянию на 2022 г. протяженность газопроводов, снабжающих промышленные предприятия, тепловые электрические станции, газовые отопительные и производственные котельные, составила 990 177,3 км.

В настоящее время по данным единой энергетической системы России на территории Российской Федерации расположено 87 теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), основным видом топлива которых является природный газ, 67 газотурбинных электростанций (12 находятся на этапе строительства, 55 — в эксплуатации), а также эксплуатируется 15 газопоршневых электростанций, 1 газопоршневая электростанция находится на этапе строительства.

Общее количество газифицированных объектов энергетического комплекса представлено на рис. 1.

Данные диаграммы (рис. 1) подтверждают тенденцию ежегодного увеличения количества газифицированных промышленных объектов и объектов энергетического комплекса.

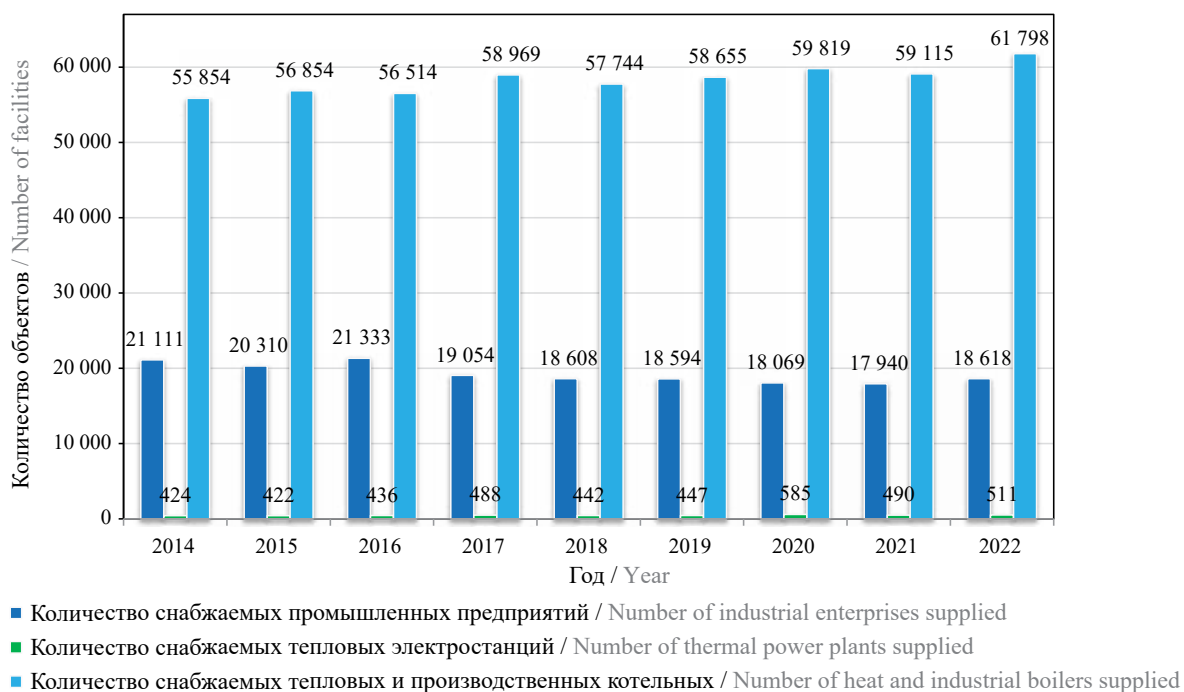


Рис. 1. Количество газифицированных объектов энергетики и промышленности

Fig. 1. Number of gasified energy and industrial facilities

Основным видом топлива на газотурбинных тепловых электростанциях является природный газ, который поступает по магистральным газопроводам в газораспределительные пункты. Пункты подготовки газа, помещения машинного зала, котельные отделения и иные помещения, в которых возможно повреждение технологического оборудования с последующей утечкой газа в окружающее пространство, представляют наибольшую пожарную опасность.

Согласно действующим нормативно-правовым актам при обнаружении аварийной утечки горючего газа в замкнутых объемах при достижении 10 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) срабатывает светозвуковая сигнализация, а при концентрациях 20 и 50 % от НКПР включается система аварийной вентиляции. Таким образом вместе с вытеснением горючего газа в помещение обеспечивается поступление окислителя.

Положим, что в замкнутом объеме произошла утечка горючего газа. Система обнаружения утечки успешно сработала при 20 % от НКПР, при этом учтем, что обнаружение утечки горючего газа производится не по всему объему, а в конкретной точке. Допустим, что место утечки совпало с местом расположения газоанализатора, тогда при начале работы системы аварийной вентиляции концентрация газа во всем объеме будет уменьшаться и при закрытии аварийного трубопровода в скором времени достигнет нуля. Однако, если место утечки не совпадет с местом расположения датчика обнаружения, тогда перед началом работы системы аварийной вентиляции концентрация

горючего газа в конкретной точке может быть выше верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР). В таком случае такая мера противопожарной защиты как аварийная подача воздуха может привести к увеличению размеров зон взрывоопасных концентраций [6–9].

Таким образом, существует проблема с предотвращением и тушением пожаров на данных объектах. Существующие системы предотвращения пожаров газов и пожаротушения работают независимо друг от друга, это две совершенно разные системы, при этом эффективность предотвращения и тушения пожаров остается достаточно низкой [5]. Одним из наиболее эффективных средств пожаротушения, в том числе и газов, является водная среда в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС) (рис. 2) [6].

В работах [17–19] струя ВСМФС классифицируется как гетерогенный двухфазный поток с полидисперсной водокапельной и монодисперсионной паровой фазами. Предотвращение пожара горючего с помощью ВСМФС обеспечивается созданием газовой среды, в которой распространение пламени становится невозможным благодаря мелкодисперсным каплям воды, которые в течение длительного времени не осажаясь находятся во взвешенном состоянии. Дополнительно будет происходить ингибирование, так как молекулы газа будут адсорбироваться на каплях ВСМФС, что не позволит инициировать возникновение горения и взрыва. Основными преимуществами предлагаемого способа будет его безопасность для

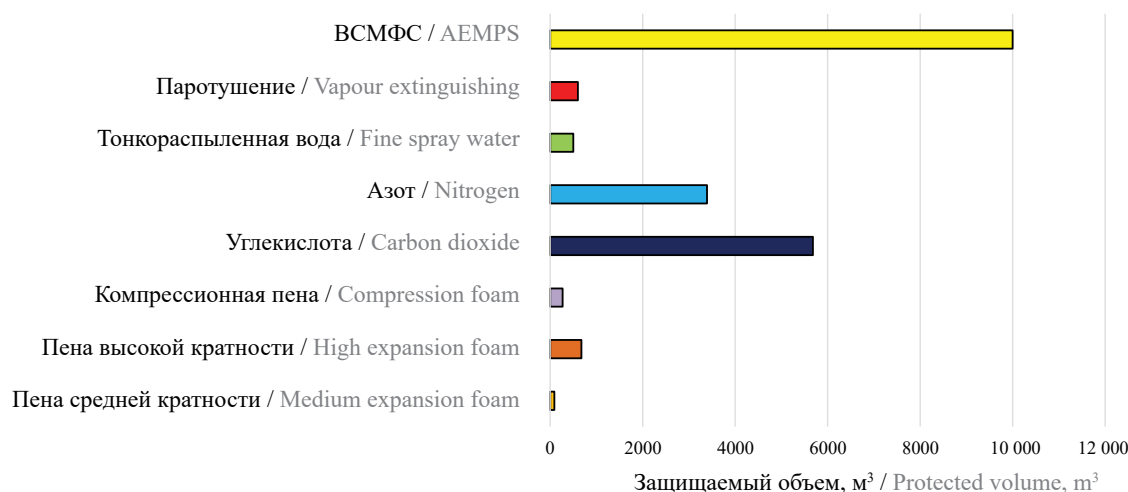


Рис. 2. Диаграмма зависимости величины защищаемого объема от вида огнетушащего вещества [5]

Fig. 2. Diagram of the dependence of the size of the protected volume on the type of extinguishing agent [5]

людей, высокая эффективность и низкие финансовые затраты на обслуживание.

Таким образом, можно предположить, что можно создать комплекс, позволяющий использовать ВСМФС для тушения и предотвращения возникновения горения горючих газов. Однако исследований по возможности предотвращения пожаров горючих газов не проводилось. Для подтверждения данной возможности на первоначальном этапе целесообразно рассмотреть физическую сторону процесса.

Целью настоящего исследования является определение особенностей водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах. Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие средства системы предотвращения пожаров газов.
2. Обосновать расчетами возможность применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах.
3. Смоделировать процесс флегматизации метана в замкнутом объеме водной средой в метастабильном фазовом состоянии и определить оптимальные параметры ее подачи.

Методика исследования и теоретические основы поставленной задачи. Выбор объекта моделирования

В [10–15] установлено, что струи ВСМФС являются эффектными при осаждении хлора, кроме того, теоретически обосновано, что ВСМФС обладает высоким сорбирующим эффектом. Однако природный газ слабо растворим в воде при нормальных условиях и его растворимость практически не зави-

сит от температуры. Таким образом, при подаче ВСМФС в замкнутый объем с газом мы получим гетерогенную смесь высокодисперсных капель воды и газа. Как известно, природный газ состоит преимущественно из метана CH_4 , НКПР которого составляет 5,28 %, а ВКПР — 14,1 %.

Для того чтобы определить объем ВСМФС, необходимый для подачи в защищаемый объем, рассчитаем ее значение минимальной флегматизирующей концентрации (МФК) при разбавлении метановоздушной смеси. МФК будет определяться количеством флегматизатора, которое можно найти из условия предельной адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси [16], где $T_{\text{г}} = 1500 \text{ K}$:

$$V_{\text{мфк}} = \frac{Q_{\text{н}} - (1500 - T_0) \cdot \sum C_{\text{пр}i} \cdot V_{\text{пр}i}}{(1500 - T_0) \cdot C_{\text{рф}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{н}}$ — низшая теплота сгорания метана, кДж/моль; T_0 — температура в помещении, примем ее за 20°C или 293 K ;

$C_{\text{пр}i}$ — среднее значение адиабатической теплоемкости продуктов сгорания, кДж/(моль·K);

$V_{\text{пр}i}$ — количество продуктов сгорания, моль/моль;

$C_{\text{рф}}$ — среднее значение адиабатической теплоемкости флегматизатора, кДж/(моль·K).

Низшая теплота сгорания метана определяется по закону Гесса:

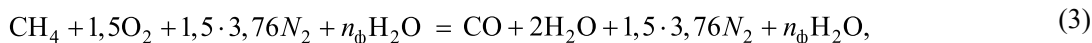
$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{\text{CO}}^0 + 2\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{\text{CH}_4}^0, \quad (2)$$

где ΔH_{CO}^0 , $2\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0$, $\Delta H_{\text{CH}_4}^0$ — теплота образования угарного газа, воды и метана соответственно.

Подставляя справочные данные теплоты образования, получим $Q_{\text{н}} = 522,1 \text{ кДж/моль}$.

Для определения количества продуктов сгорания необходимо записать уравнение материального

баланса для горения метана при добавлении флегматизатора:



где $n_{\text{ф}}$ — число молей флегматизатора.

В соответствии с уравнением материального баланса (1) примет следующий вид:

$$V_{\text{мфк}} = \frac{Q_{\text{н}} - (1500 - T_0) \cdot (\text{Cp}_{\text{co}} \cdot V_{\text{co}} + \text{Cp}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Cp}_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2})}{(1500 - T_0) \cdot \text{Cp}_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (4)$$

Количество продуктов горения определим из правой части уравнения (3), а средние значения адиабатических теплоемкостей продуктов сгорания из справочных данных подставим в (4). Получим, что количество ВСМФС в помещении 3,51 моль/моль.

По данному количеству определим концентрацию ВСМФС в замкнутом объеме для обеспечения недопущения распространения пламени в среде по следующей зависимости:

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{V_{\text{мфк}} \cdot 100}{V_{\text{CH}_4} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{CH}_4}}. \quad (5)$$

По результатам расчетов было определено, что минимально флегматизирующая концентрация ВСМФС в замкнутом объеме составляет 30,6 %. Необходимо отметить, что данная концентрация для воды в газообразном состоянии, для того чтобы достигнуть такой концентрации температура ВСМФС должна быть порядка 70 °С. Однако необходимо понимать, что данный расчет не учитывает процессы ингибирования в замкнутом объеме, поэтому действительная концентрация ВСМФС будет существенно ниже. В целях нахождения действительной концентрации необходимо проведение экспериментальных исследований.

Для обоснования системы предотвращения и тушения пожаров газов ВСМФС горючих газов в замкнутом объеме необходимо определение количества технических средств подачи.

Количество технических средств подачи ВСМФС можно определить по следующей формуле:

$$N_{\text{уст}} = \frac{W \cdot \varphi_{\text{мфк}} \cdot K_{\text{не.грм}}}{Q_{\text{уст}} \cdot t}, \quad (6)$$

где W — объем помещения, м³;

$K_{\text{не.грм}}$ — коэффициент степени негерметичности помещения;

$Q_{\text{уст}}$ — расход технического средства подачи ВСМФС, м³/с;

t — необходимое время подачи ВСМФС, с, принимаем 30 с, согласно анализу статистических данных среднее время от момента возникновения сигнала с регистрирующего устройства и возникновения возгорания и(или) взрыва [16–26].

На основе (6) была построена зависимость (рис. 3) для различной степени негерметичности.

Как видно из зависимости (рис. 3), требуемое количество стволов линейно зависит от объема помещения, стоит также отметить, что график для коэффициента негерметичности $K = 0,3$ является случаем нормальной работы, когда работает система общеобменной вентиляции, случай для коэффициента $K = 0,4$ и $0,5$ является вариантом разгерметизации и вскрытия легкосбрасываемых конструкций. Стоит отметить, что при достижении данного коэффициента негерметичности $K = 1$, это будет соответствовать подаче ВСМФС в открытое пространство, количество стволов будет принимать максимальное значение для данного объема. Однако в данном случае речи о конкретном объеме идти не может, поэтому можно предположить, что применение данной формулы определено на интервале $K = [0; 0,5]$.

Для подтверждения установленной зависимости количества установок подачи ВСМФС от объема помещения целесообразно провести моделирование процесса заполнения объема ВСМФС на объекте энергетики. В качестве объекта исследования пред-

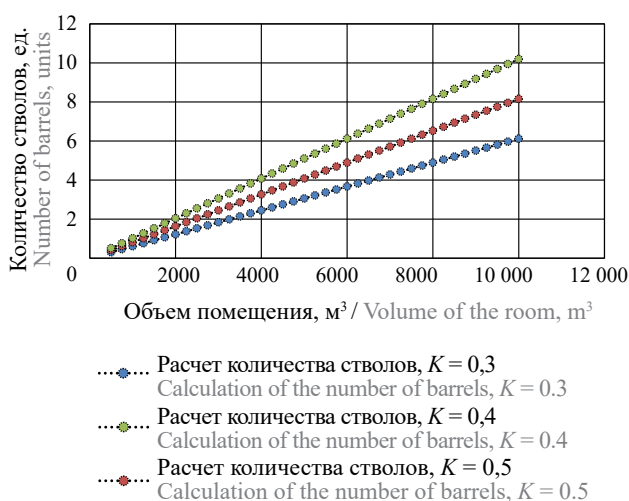
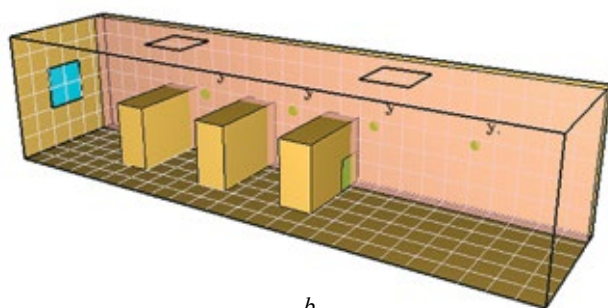


Рис. 3. Зависимость необходимого количества стволов для предотвращения возникновения пожара горючего газа в помещении в зависимости от объема помещения при различной степени негерметичности помещения

Fig. 3. Dependence of the number of barrels required to prevent a flammable gas fire in a room depending on the volume of the room at different degrees of room leakage



a



b

Рис. 4. Общий вид типового машинного зала ТЭЦ: *a* — фотография типового машинного зала; *b* — модель типового машинного зала ТЭЦ с расположенными внутри датчиками измерения концентрации метана, ВСМФС, устройствами подачи ВСМФС, проемами

Fig. 4. General view of a typical engine room of a TPP: *a* — photograph of a typical engine room; *b* — model of a typical engine room of a TPP with methane concentration sensors, AEMPS, AEMPS feeders, openings located inside

ложено выбрать типовой машинный зал ТЭЦ (рис. 4). В одном типовом машинном зале ТЭЦ стоит 3 газотурбинных агрегата и парогенераторные установки, при этом объем помещения, где располагается данное оборудование, был выбран $10\,000\text{ м}^3$ (рис. 4).

Геометрические и теплофизические параметры конструктивных элементов и материалов ТЭЦ были выбраны в соответствии с технической документацией. В машинных залах на уровне соединения технологической обвязки агрегатов были установлены приборы контроля температуры, объемной концентрации метана в помещении. Расход истечения метана из технологической обвязки был выбран исходя из наиболее вероятного отверстия в технологической обвязке [20] и величины давления в газовом трубопроводе, согласно расчетам, расход газа из отверстия диаметром 10 мм был принят 40 л/с. Требуемая степень негерметичности обеспечивалась наличием отверстия в стене. Установки подачи ВСМФС для моделируемого помещения исходя из степени негерметичности и объема были

выбраны в количестве 2 в соответствии с рис. 3. Расход установок подачи ВСМФС был задан $5\text{ м}^3/\text{с}$. Начало работы установок ВСМФС начиналась при достижении объемной концентрации метана в размере 0,2 от НКПР. Согласно технической документации на ТЭЦ, прекращение подачи метана не может быть осуществлено сразу после обнаружения утечки в силу технически связанных процессов, минимальное возможное время прекращения подачи 10 мин с момента обнаружения.

Результаты и обсуждение

Рассмотрение результатов моделирования было разделено на два блока:

- анализ процесса распространения метана в объеме машинного зала ТЭЦ;
- описание результатов, снятых детектирующими устройствами.

В первой части рассмотрим поэтапное распространение метана в объеме машинного зала ТЭЦ, при этом временные промежутки развития пожара были выбраны следующим образом:

- на момент достижения максимальной объемной концентрации метана в объеме помещений ТЭЦ, $t = 100\text{ с}$, через 60 с после подачи ВСМФС (рис. 5);
- через 30 с после прекращения выхода метана из отверстия $t = 630\text{ с}$ и на момент полного выхода метана из помещения $t = 700\text{ с}$ (рис. 5).

По результатам анализа процесса распространения метана было установлено, что за 60 с работы двух установок ВСМФС среднеобъемная концентрация метана в помещении снижается, однако его концентрация повышается в пределах объема выхода. То есть подача струй ВСМФС сверху приводит к местному повышению концентрации метана на месте выхода, что может привести к созданию стехиометрических концентраций уже после начала подачи ВСМФС. Это подтверждается показаниями, снятыми с устройства измерения объемной концентрации метана (рис. 6).

Для решения данной проблемы целесообразно подавать ВСМФС с боковой поверхности, для подтверждения данной гипотезы проведем дополнительную серию моделирования при сохранении остальных начальных условий (рис. 7).

Анализ рис. 7 показал, что до момента начала подачи огнетушащего вещества наблюдается быстрый рост концентрации метана в машинном зале, после начала подачи ВСМФС в течение 10 с происходит его резкое снижение до значения 0,04 объема. Дальнейшая подача ВСМФС с боковой поверхности не приводит к росту концентрации метана в объеме помещения и позволяет планомерно удалить газ из машинного зала ТЭЦ.

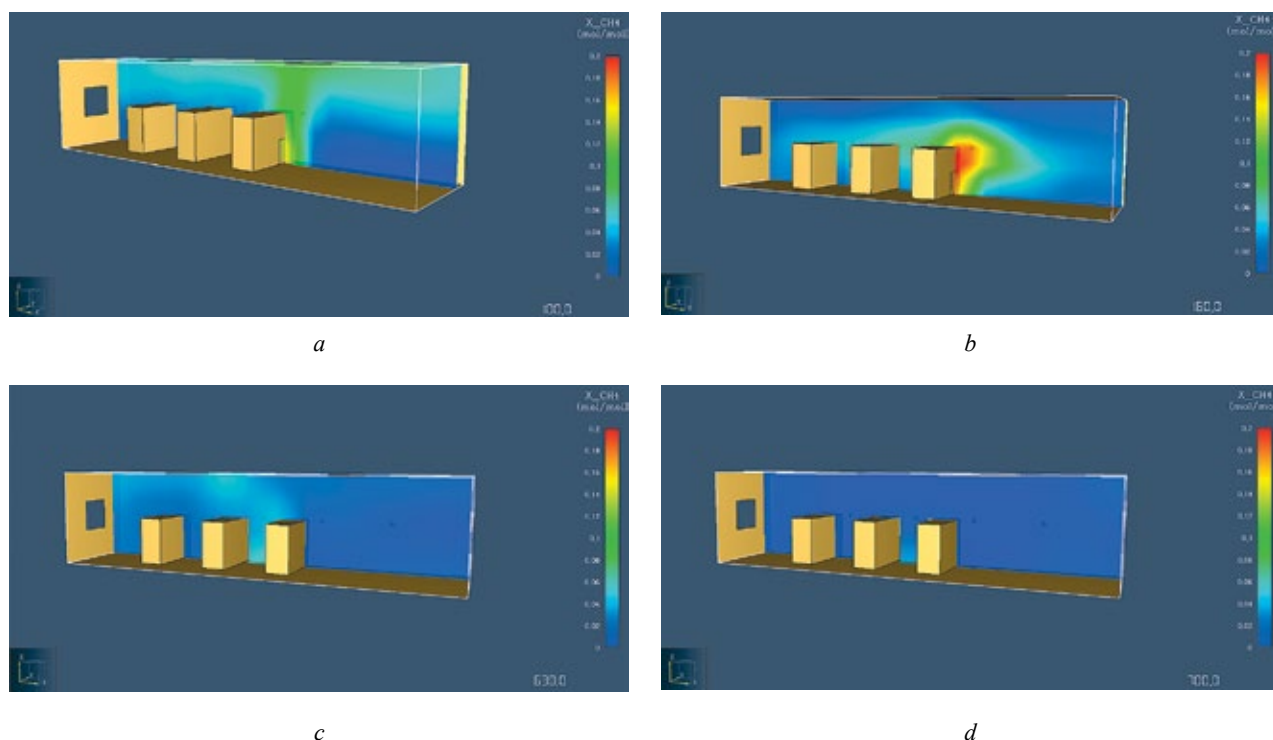


Рис. 5. Объемная концентрация метана в машинном зале: *a* — момент достижения максимальной среднееобъемной концентрации метана при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* — через 60 с после подачи ВСМФС при $t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* — через 30 с после прекращения выхода метана из отверстия при $t = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* — момент полного выхода метана из помещения $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Volumetric concentration of methane in the machine room: *a* — the moment of reaching the maximum average volumetric concentration of methane at $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* — 60 s after the supply of AEMPS at $t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* — 30 s after the cessation of methane escape from the hole at $t = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* — the moment of complete methane escape from the room at $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

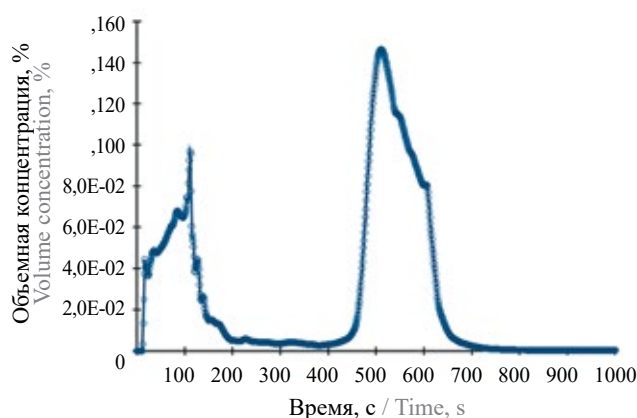


Рис. 6. Зависимость объемной концентрации метана в машинном зале от времени при подаче ВСМФС сверху
Fig. 6. Time dependence of volumetric concentration of methane in the turbine room when the AEMPS is fed from above

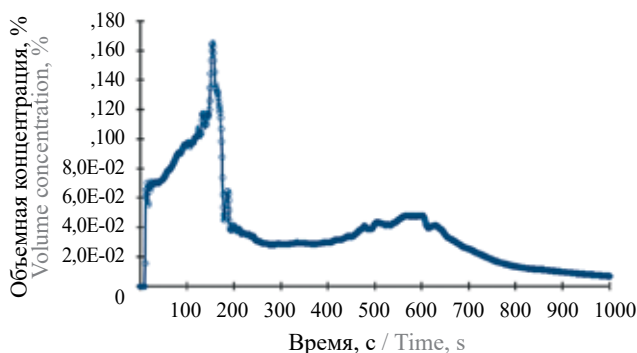


Рис. 7. Зависимость объемной концентрации метана в машинном зале от времени при подаче ВСМФС сбоку
Fig. 7. Time dependence of methane volume concentration in the engine room when AEMPS is fed from the side

Выводы

Анализ существующих средств предотвращения пожаров газов показал, что их применение может спровоцировать увеличение размеров зон взрывоопасных концентраций. Расчетами установлено, что минимально флегматизирующая концентрация ВСМФС в замкнутом объеме составляет 30,6 %. Моделирова-

нием было установлено, целесообразно устанавливать устройства подачи ВСМФС на боковых поверхностях, а достижение флегматизирующей концентрации наступает в течение 10 сек с момента подачи ВСМФС. Оптимальные параметры подачи в замкнутый объем для предотвращения пожаров будут достигаться, когда температура выхода ВСМФС будет не менее $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чистяков Т.И., Роечко В.В., Храмов С.П. К вопросу о ликвидации утечки хлора в Арктической зоне Российской Федерации с применением технологии водной среды в метастабильном фазовом состоянии // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны. В 5 ч. Ч. 2. г. Москва, 1 марта 2024 г. М. : Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 104–109. EDN VHREOU.
2. Роечко В.В., Халиков Р.В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газокomppressorных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 30–35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35
3. Азатян В.В. Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов // Кинетика и катализ. 2020. № 3. Т. 61. С. 291–311. DOI: 10.31857/S0453881120030041 EDN: YMXTTZ
4. Liu H., Wang F. Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf // PLoS ONE. 2019. Vol. 14 (9). Pp. 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
5. Azatyan V.V., Wagner G.G., Vedeshkin G.K. Suppression of detonations by efficient inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations. M. : ENAS Publishers, 1999. Pp. 331–336.
6. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Fleming suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type // Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. 2019. 21 s. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
7. Халиков Р.В. Применение ингибиторов горения для объемного пожаротушения газокomppressorных станций // Роль противопожарных служб в решении нетрадиционных угроз безопасности : мат. I Междунар. науч. конф. Вьетнам : Институт пожарной безопасности МОБ СПб, 2020. С. 1535–1540.
8. Шмаков А.Г., Коробейников О.П., Шварцберг В.М., Якимов С.А., Князьков Д.А., Комаров В.Ф., Сакович Г.В. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлосодержащих соединений и твердо-топливных газогенерирующих составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // Физика горения и взрыва. 2006. № 6. 10 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (дата обращения: 12.05.2024).
9. Коробейников О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Шварцберг В.М., Куценкогий К.П., Марков В.И. Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей для тушения различных типов пожаров // Интерэкспо ГЕО-сibirь. 2012. № 3. 10 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (дата обращения: 12.05.2024).
10. Высокоморная О.В., Марков А.О., Назаров М.Н., Стрижак П.А., Янов С.Р. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «Водяного снаряда» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (дата обращения: 12.05.2024).
11. Стрижак П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. № 7. С. 11–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennyy-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsessov-teplomassoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (дата обращения: 12.05.2024).
12. Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. № 2. С. 9–17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (дата обращения: 12.05.2024).
13. Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С. Кипение капель низкокипящей дисперсной фазы в режиме гетерогенной нуклеации // Инновационная наука. 2016. № 11-2. С. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-geterogennoy-nukleatsii> (дата обращения: 12.05.2024).
14. Хасанов Р.М., Лиштаков А.А., Чистов Ю.С. Исследование интенсивности теплового излучения в зависимости от очага пожара и площади разлива легко воспламеняющихся жидкостей и горючих веществ // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 16. С. 110–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozлива-legko-vosplamenuyushchihysya> (дата обращения: 12.05.2024).
15. Дахин С.В., Дроздов И.Г., Шматов Д.П. К определению относительной скорости капли жидкости в потоке газа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. № 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (дата обращения: 12.05.2024).

16. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2019. № 4. С. 29–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (дата обращения: 12.05.2024).
17. Бородай С.П., Летин А.Н., Шедько С.В. Экспериментальные исследования структуры пламени и его воздействия на ограждающие судовые конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 2 (392). С. 79–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayushchie-sudovye-konstruktsii> (дата обращения: 12.05.2024).
18. Пузач С.В., Абакумов Е.С. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. № 2. С. 31–34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (дата обращения: 12.05.2024).
19. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires Spill Fires. 2000. Pp. 1–36.
20. Огурцов С.Ю., Семичевский С.В. К вопросу необходимости обоснования исходных данных для моделирования процессов горения турбинного масла // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2016. № 2. 5 с.
21. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Zhdanova A.O., Strizhak P.A. Containment and suppression of compartment fires using specialized liquid compositions // Fire Safety Journal. 2024. Vol. 147. P. 104187. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104187
22. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. Pp. 344–354. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.043
23. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face // Powder Technology. 2019. Vol. 343. Pp. 754–764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042
24. Chvanov S.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S. The necessary water discharge density to suppress fires in premises // Powder Technology. 2022. Vol. 408. P. 117707. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117707
25. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103601. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103601
26. Rohilla M., Saxena A., Dixit P.K., Mishra G., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications : a review // Fire Technology. 2019. Vol. 55. Pp. 2515–2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7

REFERENCES

1. Chistyakov T.I., Roenko V.V., Khramtsov S.P. On eliminating chlorine leakage in the arctic zone of the Russian federation using technology of water environment in a meta-stable phase state. *Civil defense on guard of peace and security : Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Civil Defense Day defense. In 5 parts, Part 2. Moscow, March 1, 2024.* Moscow, Academy of State Fire Service, 2024; 104-109. EDN VHREOU. (rus).
2. Roenko V.V., Khalikov R.V. Fire and explosion safety of enclosed spaces of gas-compressor stations. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination.* 2020; 1:30-35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35 (rus).
3. Azatyan V.V. Features of the physicochemical mechanisms and kinetic laws of combustion, explosion, and detonation of gases. *Kinetics and Catalysis.* 2020; 61(3):291-311. DOI: 10.31857/S0453881120030041 EDN: YMXTTZ (rus).
4. Liu H., Wang F. Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf. *PLoS ONE.* 2019; 14(9):1-21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
5. Azatyan V.V., Wagner G.G., Vedeshkin G.K. Suppression of detonations by efficient inhibitors. *Gaseous and Heterogeneous Detonations.* Moscow, ENAS Publ., 1999; 331-336.
6. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Fleming suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type. *Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section.* 2019; 21. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
7. Khalikov R.V. The use of flame inhibitors for volumetric fire extinguishing of gas compressor stations. *Proceedings of the I International Scientific conference "The role of fire services in solving non-traditional security threats".* Vietnam, Institute of Fire Safety, SRV, 2020; 1535-1540. (rus).
8. Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V. Testing organophosphorus, organofluorine, and metal-containing compounds and solid-propellant gas-generating compositions doped with phosphorus-containing additives as effective fire suppressants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* 2006; 6:10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (accessed: 12.05.2024). (rus).
9. Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Shvartsberg V.M., Kutsenogiy K.P., Markov V.I. Application of aerosol technology and non-volatile effective fire suppressants for fire-fighting of various types of fires. *Interexpo Geo-Siberia.* 2012; 3:10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (accessed: 15.04.2024). (rus).

10. Vysokomornaya O.V., Markov A.O., Nazarov M.N., Strizhak P.A., Yanov S.R. Numerical study of the influence of water atomization conditions on the temperature in the wake of a "Water projectile". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. Geo Assets Engineering*. 2013; 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (accessed: 12.05.2024). (rus).
11. Strizhak P.A. Numerical analysis of diffusion and convection heat and mass transfer processes at the moving of water drops through high combustion products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 7:11-21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislenny-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsessov-teplo-massoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (accessed: 12.05.2024). (rus).
12. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of water droplets distribution in the "water shell" on temperature in follow movement. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 2:9-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (accessed: 12.05.2024). (rus).
13. Rosenzweig A.K., Strashinsky Ch.S. Boiling of droplets of low-boiling of dispersed phase in mode of heterogeneous nucleation. *Innovative Science*. 2016; 11-2:56-60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-geterogennoy-nukleatsii> (accessed: 12.05.2024). (rus).
14. Khasanov R.M., Lishtakov A.A., Chistov Yu.S. Study of the intensity of thermal radiation depending on the fire source and the area of filling of highly flammable liquids and combustible substances. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2017; 16:110-112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozлива-legko-vosplamenyayuschih-sya> (accessed: 12.05.2024). (rus).
15. Dakhin S.V., Drozdov I.G., Shmatov D.P. K opredeleniyu relative velocity of a liquid drop in a gas flow. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2013; 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (accessed: 12.05.2024). (rus).
16. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevsky L.T., Arakcheev A.V. Simulation of flame spread over discrete fire load. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 4:29-41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (accessed: 12.05.2024). (rus).
17. Borodai S.P., Letin A.N., Shedko S.V. Experimental studies of the structure of the flame and its impact on the enclosing ship structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020; 2(392):79-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayushchie-sudovye-konstruktsii> (accessed: 12.05.2024). (rus).
18. Puzach S.V., Abakumov E.S. Definition of flame height zone in case of liquid diffusion combustion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 2:31-34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (accessed: 12.05.2024). (rus).
19. Daniel T., Joseph T., Frederick W. *Fire dynamic of spill fires Spill Fires*. 2000; 1-36.
20. Ogurtsov S.Yu., Semichevsky S.V. On the question of the need to substantiate the initial data for modeling the combustion processes of turbine oil. *Naukoviy visnik: Tsivilny zahist ta pozhezhna bezpeka*. 2016; 2:5. (ukr).
21. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Zhdanova A.O., Strizhak P.A. Containment and suppression of compartment fires using specialized liquid compositions. *Fire Safety Journal*. 2024; 147:104187. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2024.104187
22. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 141:344-354. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.043
23. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face. *Powder Technology*. 2019; 343:754-764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042
24. Chvanov S.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S. The necessary water discharge density to suppress fires in premises. *Powder Technology*. 2022; 408:117707. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117707.
25. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103601. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103601.
26. Rohilla M., Saxena A., Dixit P.K., Mishra G., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications : a review. *Fire Technology*. 2019; 55:2515-2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7.

Поступила 04.07.2024, после доработки 30.07.2024;

принята к публикации 02.08.2024

Received July 4, 2024; Received in revised form July 30, 2024;

Accepted August 2, 2024

Информация об авторах

ХАЛИКОВ Ринат Валерьевич, старший преподаватель кафедры пожарной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

РОЕНКО Владимир Васильевич, к.т.н., профессор, профессор кафедры пожарной техники в составе учебно-научного комплекса Пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

БЕГИШЕВ Ильдар Рафатович, д.т.н., профессор, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 51507; ORCID: 0000-0001-5619-4025; e-mail: begishev@mail.ru

ХАЛИКОВА Татьяна Николаевна, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 1168933; ORCID: 0000-0002-7588-7166; e-mail: tatyana.bobyreva7@mail.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Rinat V. KHALIKOV, Senior Lecturer, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

Vladimir V. ROENKO, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Engineering as part of the Educational and Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

Ildar R. BEGISHEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 51507; ORCID: 0000-0001-5619-4025; e-mail: begishev@mail.ru

Tatyana N. KHALIKOVA, Student of the Post-Graduate Course, Academy of State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 1168933; ORCID: 0000-0002-7588-7166; e-mail: tatyana.bobyreva7@mail.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of the Testing Sector of the Explosion Safety Research Center of the Institute of Integrated Safety in Construction, Senior Lecturer at the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Представлены статистические данные о пожарах от электрооборудования. Рассмотрены действующие требования нормативных документов по проведению очистки и способам защиты электроустановок от негативного воздействия пыли и других загрязнений. Даны разъяснения о периодичности проведения технического обслуживания электрооборудования по российским и зарубежным нормам. Показана возможность применения более гибких организационно-технических решений по составлению графиков планово-предупредительного ремонта. Отмечена важность проведения регулярных проверок и технического обслуживания электрооборудования для повышения эффективности функционирования системы предотвращения пожаров.

Ключевые слова: инструкция; обслуживание; осмотр; ремонт; периодичность; техническое состояние; код IP

Для цитирования: Харламенков А. С. Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 108–112. DOI: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.04.108-112>

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Fire hazard of dust accumulation in electrical installations. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Statistical data on fires caused by electrical equipment are presented. The current requirements of regulatory documents on cleaning and methods of protecting electrical installations from the negative effects of dust and other contaminants are considered. Explanations on the frequency of maintenance of electrical equipment according to Russian and foreign standards are given. The possibility of using more flexible organizational and technical solutions for scheduling preventive maintenance is shown. The importance of regular inspections and maintenance of electrical equipment for increasing the efficiency of the fire prevention system is noted.

Keywords: instructions; maintenance; inspection; repair; frequency; technical condition; IP code

For citation: Kharlamenkov A.S. Fire hazard of dust accumulation in electrical installations. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):108-112. DOI: [10.22227/0869-7493.2024.33.04.108-112](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.04.108-112).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС

Выполнение профилактических мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) действующих электроустановок является неотъемлемой частью системы предотвращения пожаров. Согласно ст. 49 «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности»¹ одним из способов, исключающих условия образования горючей среды, является периодическое удаление из помещений, технологического оборудования и коммуникаций пожароопас-

ных отходов производства, а также отложений пыли и пуха. Наряду с другими эффективными способами предупреждения пожароопасной ситуации регулярная очистка электрооборудования от пыли позволяет продлить срок его службы и снизить вероятность возникновения аварийных режимов работы, таких как токовая перегрузка, короткое замыкание и большое переходное сопротивление [1].

За последние пять лет число пожаров по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования продолжает неуклонно расти (рис. 1) и на 2023 г. составляет более 16,8 % от общего числа пожаров [2].

Среди различных видов электроустановок, где излишнее накопление пыли может способствовать разви-

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в редакции от 25.12.2023 г.): Федеральный закон Российской Федерации от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ; принят Государственной Думой 4 июня 2008 г.

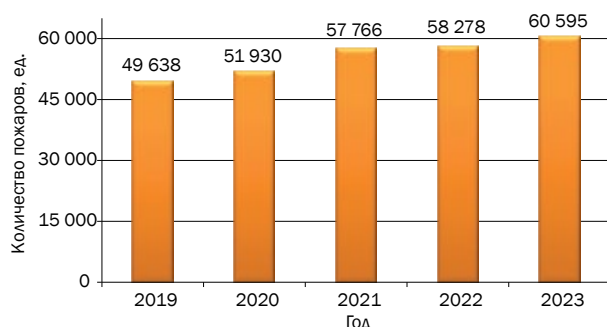


Рис. 1. Статистика пожаров по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования за 2019–2023 гг. [2, 3]



Рис. 2. Диаграмма распределения причин пожаров от различных видов электрических изделий и электрооборудования за 2023 г.

тию пожара, можно выделить: электрические шкафы; групповые кабельные линии, проложенные в запотолочном пространстве; различные бытовые приборы (холодильники, стиральные машины, духовые печи и другое). На перечисленные виды электроустановок, за исключением проводов и кабелей, приходится более 10 % пожаров (рис. 2) [3].

Усугубляет ситуацию и степень износа основных фондов машин и оборудования системы обеспечения электроэнергией в РФ, которая по состоянию на 2022 г. составляет более 50 % [4]. Это указывает на необходимость уделять большее внимание вопросам качественного ТО действующих электроустановок.

Какие нормативные документы определяют порядок ТО и периодичность очистки электрооборудования от пыли и иных загрязнений с целью обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений?

ОТВЕТ

В соответствии с пп. 124 и 132 «Правил противопожарного режима в РФ»² (далее ППР РФ) проведение работ по очистке оборудования помещений от пыли обеспечивает руководитель организации. Порядок и периодичность уборки пыли должны определяться техническим регламентом выполнения работ и указываться в инструкции о мерах пожарной безопасности (п. 393 Правил)², а результаты выполнения отражены в журнале

² Правила противопожарного режима в Российской Федерации (ред. от 30.03.2023) : утверждены постановлением Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. № 1479.

учета работ по проведению очистки оборудования (журнал ТО и ремонта оборудования или журнал эксплуатации систем противопожарной защиты).

В общественных и жилых зданиях наибольшее внимание следует уделять обслуживанию распределительных устройств (электрические щиты и шкафы), которые характеризуются высокой пожарной опасностью из-за наличия в них большого количества питающих проводов и кабелей, аппаратов защиты и других приборов.

В старой редакции «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей»³ (ПТЭП) во 2-м разделе (п. 2.2.17) было указано, что оборудование распределительных устройств должно периодически очищаться от пыли и грязи в сроки, установленные ответственным за электрохозяйство, а сам процесс очистки должен выполняться обученным персоналом с соблюдением правил безопасности. В действующей редакции ПТЭП⁴ данное требование отсутствует. В то же время в п. 88 «Правил организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики»⁵ указана необходимость уборки наружных поверхностей оборудования от пыли в рамках программы подготовки к выполнению ремонта основного оборудования (планово-предупредительного ремонта).

Конкретных сроков периодичности выполнения работ по выполнению очистки электрооборудования от пыли и иных загрязнений в нормативных документах нет. Для одного и того же устройства в зависимости от типа помещения (жаркое, влажное, пыльное и т.д.) и места установки (снаружи или внутри здания) сроки очистки могут быть различными. Рекомендуемая периодичность работ обычно указывается в инструкциях по эксплуатации, технических паспортах, информационных сообщениях и письмах изготовителей оборудования. На основе обобщенных сведений по результатам анализа условий эксплуатации и технической документации составляется локальный нормативный акт (инструкция, план, график, программа по выполнению работ), которым в дальнейшем руководствуется обслуживающий персонал.

Тем не менее для электрооборудования общественных и промышленных зданий (в том числе оборудования систем противопожарной защиты) в качестве рекомендуемой периодичности очистки устанавливается срок — не реже 1 раза в 6 месяцев. Для пыльных производственных помещений интервалы проведения работ могут быть уменьшены. Например, в п. 124 ППР РФ² периодичность очистки оборудования привязана к категориям помещений по взрывопожарной и пожарной опасности, а именно:

- для помещений категорий А и Б — не реже 1 раза в квартал;

³ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утв. Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 № 6 в ред. от 13.09.2018) — утратили силу.

⁴ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утв. Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 г. № 811).

⁵ Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики (утв. Приказ Минэнерго России от 25.10.2017 № 1013).

Таблица 1. Условия оценки технического состояния электрооборудования по требованиям NFPA 70B⁶

Условие 1	Условие 2	Условие 3
Критерии состояния электрооборудования		
Оборудование выглядит как новое	Результаты ТО отличаются от прошлых результатов или указывают на более частое ТО в соответствии с требованиями инструкций производителя	Оборудование два раза подряд не проходило плановое ТО в соответствии с EMP
Корпус должен быть чистым, герметичным, без следов попадания пыли и влаги	В ходе предыдущего цикла ТО были выявлены проблемы, требующие ремонта или замены основных компонентов оборудования	В ходе двух предыдущих плановых проверок в рамках ТО были выявлены проблемы, требующие ремонта или замены основных компонентов оборудования
Уведомления от системы непрерывного мониторинга (при ее наличии) на момент проверки не поступали	Имеются уведомления от системы непрерывного мониторинга (при ее наличии) на момент проверки	От системы непрерывного мониторинга (при ее наличии) поступает активное уведомление
Действующие рекомендации, основанные на методах прогнозирования, отсутствуют (рекомендации производителя по обслуживанию оборудования)*	Существуют активные рекомендации, основанные на методах прогнозирования (имеются рекомендации производителей по обслуживанию оборудования)	С помощью методов прогнозирования определены неотложные действия (имеются рекомендации производителей по устранению неисправностей оборудования)
Предыдущее ТО было выполнено в соответствии с программой ТО электрооборудования (EMP)	–	–

* Например, если проверка технического состояния электрооборудования была впервые выполнена через 12 месяцев с момента его ввода в эксплуатацию, а производитель в инструкции или техническом паспорте указал необходимость проверки (ремонта, замены, обслуживания и т.п.) оборудования с периодичностью 1 раз в 6 месяцев, то проверяемое оборудование не соответствует 4-му критерию по условию 1 и далее проверяется на соответствие условию 2. Помимо требований инструкций производителя, должны учитываться положения действующих ведомственных норм и правил.

- для помещений категорий В1–В4 — не реже 1 раза в полугодие;
- для помещений Г и Д — не реже 1 раза в год.

Очистка электрооборудования систем противопожарной защиты зданий и сооружений должна выполняться обслуживающей организацией, имеющей лицензию.

В многоквартирных жилых домах ТО электрических устройств и оборудования, включающее очистку от пыли и мусора, должно выполняться силами электротехнического персонала управляющих организаций (компаний).

Представляют определенный практический интерес требования зарубежных стандартов по очистке электрооборудования от пыли и других загрязнений. Так, в 2023 г. в США вышла новая версия стандарта Национальной ассоциации противопожарной защиты по обслуживанию электрооборудования (NFPA 70B⁶). Ранее рекомендуемые мероприятия в последней редакции NFPA 70B превратились в полноценные требования обслуживания, которые касаются всего перечня электрооборудования и состоят из следующих периодических процедур: визуальный осмотр, очистка, смазка, ремонт, испытания. Обязательная (первичная) проверка всего электрооборудования по NFPA 70B должна выполняться не реже 1 раза в год в рамках двух последовательных ТО. В дальнейшем указанные выше работы по ТО могут проводиться чаще или реже в зависимости от технического состояния электрооборудования. При каждом плановом ТО оно оценивается по трем «условиям», имеющим определенные критерии (табл. 1). Периодичность обязательной

проверки, не реже 1 раза в год, распространяется только на электрооборудование, которое соответствует «условию 1» по всем критериям. В противном случае частота проверок должна быть увеличена.

На основании оценки технического состояния электрооборудования определяется периодичность его обслуживания, указанная в табл. 9.2.2. NFPA 70B⁶. Ниже приведена часть указанной таблицы, касающаяся только выполнения визуального осмотра и очистки отдельных видов электрооборудования от пыли и других загрязнений (табл. 2). Следует отметить, что приоритет по частоте проведения ТО отдается требованиям инструкций производителя и действующих ведомственных норм и правил.

Как видно из табл. 2, для большей части электрооборудования периодичность ТО составляет от 1 до 5 лет и чем лучше состояние электрооборудования, тем реже необходимо проводить его повторную проверку. Для отдельных видов электрооборудования, находящегося в предаварийном состоянии (условие 3), может потребоваться ежемесячная проверка.

После выполнения первичной оценки технического состояния электрооборудования рекомендуется придерживаться периодичности проверок, выбранной по табл. 9.2.2 NFPA 70B⁶ в течение двух последовательных циклов ТО. Если по их завершении у эксплуатируемого электрооборудования не выявлено нарушений, то интервалы повторных проверок и ТО могут быть увеличены и превышать значения, указанные в табл. 9.2.2 NFPA 70B⁶. Аналогичное требование касается электрооборудования, для которого не выполнялись критерии по условию 1. Если после двух циклов ТО у такого оборудования не было выявлено нару-

⁶ NFPA 70B. Standard for Electrical Equipment Maintenance / American National Standard. 2023.

шений, то интервал проверок может быть увеличен до значений, указанных в таблице 9.2.2 по условию 1.

Для отдельных видов электрооборудования (например, адресных пожарных извещателей) используются программные продукты, позволяющие настроить автоматическое оповещение о необходимости очистки (продувки) от скопления пыли внутри корпуса с учетом требований инструкций производителя. В случае размещения на объекте большого количества различных видов электрооборудования целесообразно разработать и сформировать единую базу данных, содержащую периодичность ТО и позволяющую заблаговременно оповещать обслуживающий персонал о сроках его проведения.

Основным способом, исключающим попадание влаги и накопление пыли внутри корпуса электрооборудования, является применение оболочек с различной степенью защиты (код IP) согласно ГОСТ 14254–2015 (IEC 60529:2013)⁷. Выбор конкретной степени защиты зависит от типа помещения (жаркое, влажное, пыльное и т.д.) и особенностей технологического процесса производства. Так, например, в табл. 5.4 СП 256.1325800.2016⁸ представлены минимально допустимые степени защиты светильников для освещения непожаро- и невзрывоопасных помещений с различными условиями среды. Для пыль-

ных помещений рекомендуемые степени защиты светильников находятся в диапазоне IP51-54 (в зависимости от типа лампы).

Выбор степени защиты для электрооборудования, установленного в пожароопасных зонах, осуществляется по данным гл. 7.4 Правил устройства электроустановок⁹ (ПУЭ). Так, для помещений, отнесенных по ПУЭ⁹ к пожароопасной зоне П-II (наличие пыли), минимальная степень защиты для электрических машин, аппаратов и приборов должна составлять IP44 или IP54 (см. табл. 7.4.1 и 7.4.2 гл. 7.4 ПУЭ), а для осветительных приборов — IP53 (см. табл. 7.4.3 гл. 7.4 ПУЭ).

Во взрывоопасных зонах по требованиям СП 423.1325800.2018¹⁰, помимо маркировки взрывозащиты (Ex), электрооборудование должно иметь минимальную степень защиты оболочки IP, которая устанавливается в зависимости от применяемого вида взрывозащиты (см. табл. 5.3¹⁰) и варьируется в диапазоне:

- IP54 — для взрывоопасных зон класса 0 (взрывоопасные парогазовоздушные смеси);
- IP54-66 — для взрывоопасных зон классов 1 и 2 (взрывоопасные парогазовоздушные смеси);
- IP65-66 — для взрывоопасных зон класса 20 (взрывоопасные пылевоздушные смеси);

⁷ ГОСТ 14254–2015 (IEC 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP) : введен в действие с 01.03.2017 г. М. : Стандартинформ, 2019.

⁸ СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа : введен в действие с 02.03.2017 г. М. : Стандартинформ, 2017.

⁹ Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы 6 и 7 изданий. М. : изд. Кодекс, 2019. 832 с.

¹⁰ СП 423.1325800.2018. Электроустановки низковольтные зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах: введен в действие с 25.06.2019 г. М. : Стандартинформ, 2019.

Таблица 2. Интервалы ТО по очистке различных видов электрооборудования от пыли и других загрязнений по NFPA 70B⁶ (табл. 9.2.2)

Вид электрооборудования	Вид работ	Техническое состояние электрооборудования		
		Условие 1	Условие 2	Условие 3
		Периодичность обслуживания, через каждые (мес.)		
Аккумуляторы систем накопления энергии	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Шинопроводы	Визуальный осмотр	60	60	12
	Очистка		36	
Кабельные лотки	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	60	36	12
Системы передачи мощности электрооборудования (зарядные станции)	Визуальный осмотр	60	36	12
Устройства защитного отключения (УЗО)	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	60	36	12
Заземляющие устройства	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	–	–	–
Осветительные приборы	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Автоматические выключатели и предохранители	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Оборудование для управления двигателем	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Панели управления и распределительные щиты	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка	60	36	12

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Вид электрооборудования	Вид работ	Техническое состояние электрооборудования		
		Условие 1	Условие 2	Условие 3
		Периодичность обслуживания, через каждые (мес.)		
Портативные электрические инструменты и оборудование	Визуальный осмотр	Перед каждым использованием	Перед каждым использованием	Перед каждым использованием
	Очистка			
Силовые и распределительные трансформаторы	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	60	36	12
Силовые кабели	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Защитные реле, электромеханические	Визуальный осмотр	36	24	12
	Очистка			
Реле защиты, твердотельные и микропроцессорные	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Стационарные резервные батареи	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Подстанции	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	60	36	12
Разъединители (рубильники)	Визуальный осмотр	60	36	12
	Очистка			
Распределительные устройства	Визуальный осмотр	12	12	6
	Очистка	60	36	12
Источники бесперебойного питания	Визуальный осмотр	6	3	1
	Очистка	12	6	3
Электроустановочные изделия	Визуальный осмотр	12	3	1
	Очистка	60	36	12

- IP54-66 — для взрывоопасных зон классов 21 и 22 (взрывоопасные пылевоздушные смеси).

Таким образом, регулярный контроль технического состояния электроустановок, выполнение регламентных работ по очистке электрооборудования от пыли и других загрязнений в рамках ТО являются эффективными мерами по пред-

упреждению развития пожароопасной ситуации в зданиях и сооружениях. Применение более гибких графиков проведения ТО в зависимости от технического состояния оборудования с использованием современного программного обеспечения позволит оптимизировать материальные затраты на реализацию системы предотвращения пожаров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черкасов В.Н., Бутко В.С., Горбунова М.И., Зыков В.И., Крупин М.В., Крылов А.Н. и др. Пожарная безопасность электроустановок: учебник / под ред. В.И. Зыкова. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Академия ГПС МЧС России, 2024. 436 с.

2. Чечетина Т.А., Гончаренко В.С., Матюшин Ю.А., Надточий О.В. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2023 году // Пожарная безопасность. 2024. № 1 (114). С. 102–119.

3. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информ.-аналит. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.

4. Российский статистический ежегодник. 2023: стат. сб. М., 2023. 701 с.

Материал поступил в редакцию 14.07.2024
Received July 14, 2024

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!