

5-2023

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ОБЗОР ПОДХОДОВ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО СНИЖЕНИЮ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ
ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ
К МЕСТУ ВЫЗОВА



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

Журнал издаётся 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 25.10.2023.

Выход в свет 29.10.2023.

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, Ньютаунбаби, 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)

Брушлинский Н.Н., д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель
науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Москва, Россия)

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, Юниверсити-Парк, Пенсильвания, США)

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.В. ПЕХОТИКОВ, А.А. АБАШКИН,
А.В. ГОЛКИН, А.В. ГОМОЗОВ
Противопожарные требования к зданиям и сооружениям
для отдыха и оздоровления детей

5

A.V. PEKHOTIKOV, A.A. ABASHKIN,
A.V. GOLKIN, A.V. GOMOV
Fire safety requirements for buildings and structures
for recreation and recuperation of children

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Н.И. КОНСТАНТИНОВА, А.В. ЗУБАНЬ,
Б.Б. СЕРКОВ, Н.В. ГОЛОВ
Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий

16

N.I. KONSTANTINOVA, A.V. ZUBAN,
B.B. SERKOV, N.V. GOLOV
Fire protection of floor carpets

А.А. ГАЛИГУЗОВ, А.А. СЕРДАН (мл.),
Н.В. ЯШИН, В.В. АВДЕЕВ
Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные
свойства и огнезащитную эффективность полимерных
материалов на его основе

26

A.A. GALIGUZOV, A.A. SERDAN (jr.),
N.V. YASHIN, V.V. AVDEEV
Influence of PVC compound composition
on the performance properties and flame retardant
efficiency of polymer materials

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

А.А. ЕВСИКОВ, И.В. САМАРИН
Обнаружение очагов возгорания
на технологических объектах с использованием
сверточной нейронной сети

40

A.A. EVSIKOV, I.V. SAMARIN
Detection of fires at technological
facilities using convolutional
neural network

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRICAL ENGINEERING

С.В. ПУЗАЧ, О.С. ЛЕБЕДЧЕНКО,
В.И. ЗЫКОВ, А.Л. ХОЛОСТОВ, Т.И. ЧИСТЯКОВ
Экспериментальная оценка эффективности
применения вспучивающихся огнезащитных покрытий
для электрических проводов и кабелей при одновременном
воздействии пожара и токовой нагрузки

49

S.V. PUZACH, O.S. LEBEDCHENKO, V.I. ZYKOV,
A.L. KHOLOSTOV, T.I. CHISTYAKOV
Experimental evaluation of the efficiency
of application of intumescent flame retardant
coatings for electric wires and cables under
simultaneous fire and current load impact

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

О.С. МАЛЮТИН, Р.Ш. ХАБИБУЛИН
Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования
управленческих решений по снижению времени прибытия
подразделений пожарной охраны к месту вызова

60

O.S. MALYUTIN, R.Sh. KHABIBULIN
Approaches, methods and algorithms
for substantiating management decisions
to reduce the fire units arrival time

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

А.Н. ГРИГОРЬЕВ, В.Б. ЗАХАРЕВСКИЙ,
Д.С. ЕВТЕЕВ, С.Н. АНИКИН
Обоснование возможности пожаротушения углекислым
газом коллекторов инженерных коммуникаций
с использованием передвижной пожарной техники

78

A.N. GRIGORIEV, V.B. ZAKHAREVSKIY,
D.S. EVTEEV, S.N. ANIKIN
Substantiation of the possibility of carbon
dioxide fire extinguishing of utility collectors
using mobile fire-fighting equipment

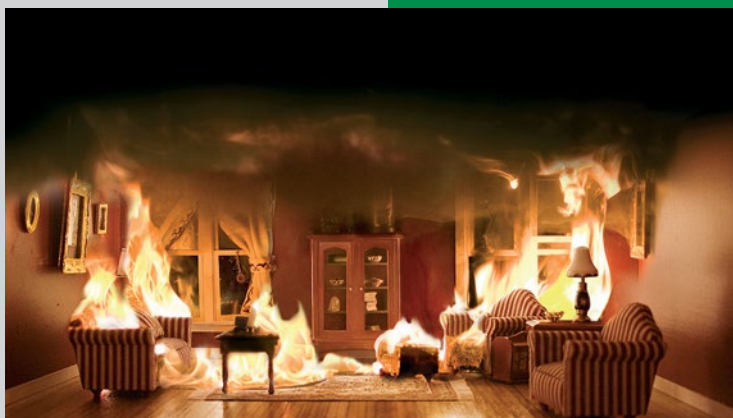
ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА —
ознакомление международного сообщества
с результатами исследований, проводимых
российскими и зарубежными учеными
в области комплексной безопасности.

THE MAIN AIM OF THE JOURNAL —
acquaintance of the international community
with results of the researches conducted
by the Russian and foreign scientists in the field
of integrated security.



Противопожарные требования к зданиям для отдыха детей

Стр. 5



Стр. 16

Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий



Обнаружение очагов возгорания с помощью нейронной сети

Стр. 40



Стр. 49

Вспучивающиеся огнезащитные покрытия для проводов и кабелей

Стр. 60



Снижение времени прибытия пожарной охраны к месту вызова

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



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 25.10.2023.

Date of publication 29.10.2023.

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)

N.N. Brushlinskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural
Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of
Russia, Moscow, Russia)

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 Engi-
neering, 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)

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 5. С. 5–15
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(5):5-15

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.5-15>

Противопожарные требования к зданиям и сооружениям для отдыха и оздоровления детей

Андрей Владимирович Пехотиков, Александр Анатольевич Абашкин,
Алексей Викторович Голкин, Александр Васильевич Гомозов ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство и реконструкция зданий и сооружений для отдыха и оздоровления детей обуславливают необходимость разработки современных требований, а также актуализацию существующих требований к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий и сооружений в части объемно-планировочных и конструктивных решений, используемых конструкций и материалов, обеспечения возможности безопасной эвакуации и спасения находящихся в этих зданиях детей, инженерным системам противопожарной защиты, а также оптимизации затрат на объемно-планировочные и конструктивные решения. Целью статьи является разработка дополнительных и актуализированных требований к системам противопожарной защиты капитальных спальных корпусов на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления детей сезонного и круглогодичного функционирования, а также разработка новых современных требований к проектированию систем противопожарной защиты одноэтажных каркасно-тентовых и быстровозводимых некапитальных сооружений со спальными местами для детей.

Методы. Используется аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты зданий и сооружений для отдыха и оздоровления детей на основе применения положений № 123-ФЗ, базовых положений нормативных документов в области пожарной безопасности, имеющегося опыта проектирования и практике борьбы с пожарами в этих зданиях.

Результаты. Результаты работы внедрены в стандарты организаций и своды правил, регламентирующие требования пожарной безопасности при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений для отдыха и оздоровления детей со спальными местами.

Выводы. На основе исследований проведено обоснование современных требований к проектированию систем противопожарной защиты спальных корпусов и каркасно-тентовых сооружений со спальными местами для детей, направленных на повышение безопасности находящихся в них детей при эвакуации и спасении с учетом пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, а также используемых строительных материалов и инженерного оборудования.

Ключевые слова: спальные корпуса для детей; каркасно-тентовые сооружения; предел огнестойкости; класс пожарной опасности; эвакуация; спасение

Для цитирования: Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Голкин А.В., Гомозов А.В. Противопожарные требования к зданиям и сооружениям для отдыха и оздоровления детей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.5-15

✉ Гомозов Александр Васильевич, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Fire safety requirements for buildings and structures for recreation and recuperation of children

Andrey V. Pekhotikov, Alexander A. Abashkin, Aleksey V. Golkin, Alexander V. Gomozov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Construction and reconstruction of buildings and facilities for recreation and recuperation of children necessitate the development of modern requirements, as well as updating of existing requirements for the design of fire protection systems of these buildings and facilities in terms of space-planning and design solutions, used structures and materials, ensuring the possibility of safe evacuation and rescue of children in these buildings, fire

protection engineering systems, as well as cost optimization for space-planning and design solutions. The purpose of the article is to develop additional and updated requirements for fire protection systems of capital dormitory buildings on the territory of stationary organizations of recreation and recuperation of children of seasonal and year-round functioning, as well as the development of new modern requirements for the design of fire protection systems of single-story frame tent and fast erected non-capital structures with sleeping places for children.

Methods. The analytical method of substantiation and formulation of requirements to the design of fire protection systems of buildings and structures for recreation and recuperation of children is used on the basis of application of the provisions of Federal law No. 123-FZ, basic provisions of regulatory documents in the field of fire safety, existing design experience and practice of fire fighting in these buildings.

Results. The results of the work are implemented in the standards of organizations and codes of practice regulating the requirements of fire safety in the construction and operation of buildings and structures for recreation and recuperation of children with sleeping places.

Conclusions. On the basis of researches, the substantiation of modern requirements to the design of fire protection systems for dormitory buildings and frame tent constructions with sleeping places for children, aimed at increasing the safety of children in them during evacuation and rescue, taking into account the fire resistance limits and fire hazard classes of building constructions, as well as used building materials and engineering equipment is carried out.

Keywords: dormitory buildings for children; frame tent structures; fire resistance limit; fire hazard class; evacuation; rescue

For citation: Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Golkin A.V., Gomofov A.V. Fire safety requirements for buildings and structures for recreation and recuperation of children. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.5-15 (rus).

✉ Alexander Vasilievich Gomofov, e-mail: Gomofovav@yandex.ru

Введение

Развитие системы стационарных организаций отдыха и оздоровления детей сезонного и круглогодичного функционирования является важной социальной задачей, которая решается на основе реконструкции и капитального ремонта существующих объектов, а также применения современных архитектурных решений и строительных технологий при возведении и монтаже новых объектов.

В частности, как показывает практика, актуальны для устройства проживания детей на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления круглогодичного функционирования использование одноэтажных некапитальных зданий быстровозводимого типа, а также монтаж каркасно-тентовых сооружений в виде одноэтажных некапитальных сооружений с покрытием, выполненным из тента.

Это обуславливает необходимость разработки современных требований к системам противопожарной защиты подобных зданий и сооружений, учитывающих такие специфические особенности, как удаленность от пожарных частей, поведение при пожаре находящихся в них детей, накопленный опыт обеспечения их противопожарной защиты и тушения пожаров, новые требования нормативных документов в области пожарной безопасности, новые научные разработки в области противопожарной защиты и другое.

Возрастные, физические и психологические особенности детей, находящихся в данных зданиях (в том числе в ночное время), определяют высокую вероятность их нерационального поведения при пожаре, с учетом чего достаточно сложно обеспечить организованную эвакуацию всего контингента детей [1].

Это делает необходимым реализацию мероприятий по ограничению распространения пожара на пути эвакуации, проектированию дополнительных путей эвакуации и эвакуационных выходов, ограничению высоты и этажности зданий, в которых находятся дети в ночное время, внедрению объемно-планировочных и конструктивных решений, позволяющих обеспечить безопасное спасение и т.д.

Цель настоящей статьи — разработка новых, отсутствующих в нормативных документах и обоснование актуализированных требований к проектированию систем противопожарной защиты капитальных зданий спальных корпусов на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления детей сезонного и круглогодичного функционирования; разработка новых современных требований к проектированию систем противопожарной защиты каркасно-тентовых и одноэтажных быстровозводимых некапитальных сооружений со спальными местами для детей.

Использован аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий на основе комплексного применения положений Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ) [2], учета современных архитектурных и конструктивных тенденций строительства подобных зданий, новых требований по противопожарной защите объектов класса функциональной пожарной опасности Ф1.1, а также накопленного опыта противопожарной защиты этих объектов.

Градостроительные требования

Требования по проектированию градостроительных решений, размещению на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления детей сезонного и круглогодичного функционирования капитальных, быстровозводимых некапитальных зданий спальных корпусов и каркасно-тентовых сооружений со спальными местами для детей направлены на обеспечение эффективности проведения работ по спасению людей в условиях пожара, а также на ограничение распространения пожара между этими зданиями и сооружениями.

Принимая во внимание особенности поведения детей при пожаре, фактор необходимости обеспечения возможности их спасения пожарными подразделениями играет ключевую роль в формировании противопожарных требований к этажности зданий и сооружений.

С учетом этого разработанными требованиями предусмотрено, что строительство 3-этажных спальных корпусов возможно только для объектов круглогодичного функционирования и допускается на территориях, для которых обеспечено время прибытия первого пожарного подразделения не более 10 мин.

Обеспечение необходимых противопожарных расстояний между спальными корпусами для детей позволяет сократить число детей, которые подвергнутся воздействию опасных факторов пожара и для которых потребуется дополнительный персонал для их эвакуации и дополнительные пожарные подразделения для спасения.

Учитывая это, разработаны дополнительные требования, которые необходимы по следующим причинам. Положениями [3] предусмотрено, что противопожарные расстояния между некапитальными, временными сооружениями (постройками) не нормируются, если их суммарная площадь застройки (размещения) не превышает 800 м². Данные требования представляются недостаточно корректными для временных некапитальных быстровозводимых спальных корпусов с детьми. Исходя из этого, новыми дополнительными требованиями предусмотрено, что противопожарные расстояния между быстровозводимыми некапитальными зданиями спальных корпусов, а также расстояния от них до капитальных зданий должны соответствовать нормативным требованиям, предъявляемым к капитальным зданиям.

Каркасно-тентовые сооружения со спальными местами для детей в силу своих конструктивных особенностей классифицируются как сооружения класса функциональной пожарной опасности Ф1.1, имеющие V степень огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности С3. С учетом этого нормативное противопожарное расстояние между

каркасно-тентовыми сооружениями и от этих сооружений до соседних зданий на территории стационарных детских оздоровительных лагерей должно быть не менее 15 м.

Согласно новым разработанным требованиям, допускается предусматривать расстояние между каркасно-тентовыми сооружениями менее 15 м (но не менее 3 м) при условии, что эти сооружения установлены группой, отвечающей следующим условиям:

- общее количество спальных мест в группе не должно превышать 45 мест;
- площадь участка, на котором размещается группа сооружений, не превышает 1200 м²;
- расстояние между группами, а также минимальное расстояние от любого сооружения в группе до зданий и других сооружений должно быть не менее 15 м.

Каркасно-тентовые сооружения в группе должны располагаться параллельными рядами на расстоянии не менее 3 м друг от друга, при этом выходы из сооружений, расположенных в одном ряду, должны быть ориентированы на одну сторону. Спланированные проходы и дорожки между сооружениями должны иметь ширину не менее 1,5 м.

Сооружения, расположенные на нормативном противопожарном расстоянии друг от друга и от сооружений в составе группы, рассматриваются как самостоятельные (отдельно стоящие) сооружения, не входящие в группу каркасно-тентовых.

Для обеспечения возможности эффективных действий пожарных подразделений по тушению пожаров и спасению людей проезды и подъезды пожарной техники к каждой группе каркасно-тентовых сооружений должны быть предусмотрены шириной не менее 3,5 м со всех сторон. Данные проезды могут быть предусмотрены по спланированной территории.

При невозможности выполнения требований нормативных документов в части устройства пожарных проездов, подъездов и обеспечения доступа подразделений пожарной охраны для тушения пожара и проведения аварийно-спасательных работ возможность обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны на объекте защиты должна подтверждаться в документах предварительного планирования действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ.

Объемно-планировочные и конструктивные решения

Практика противопожарной защиты капитальных зданий спальных корпусов на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления

детей [4–6] традиционно базировалась на ограничении этажности этих зданий.

Так, согласно положениям [4–6], здания летних детских оздоровительных лагерей могут проектироваться высотой не более двух этажей, а здания детских оздоровительных лагерей круглогодичного использования — не более трех этажей вне зависимости от степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности. При этом учреждения отдыха летнего функционирования V степени огнестойкости, а также здания детских оздоровительных учреждений IV и V степеней огнестойкости должны проектироваться только одноэтажными.

Положения [7] также регламентируют возможность размещения спальных помещений в летних организациях временного проживания для детей не выше второго этажа.

Данные требования позволяют обеспечить возможность безопасного спасения детей при пожаре в условиях, когда пожарные депо размещены на достаточном удалении и прибытие пожарных подразделений не может быть обеспечено в короткие сроки.

Необходимо отметить, что требованиями [4–6] к капитальным зданиям спальных корпусов предусмотрено ограничение спальных мест для детей как в отдельных частях зданий, так и в зданиях в целом. Согласно этим требованиям, спальные помещения оздоровительных лагерей в отдельных зданиях или отдельных частях зданий (выделенных пожарных отсеках) должны быть не более чем на 160 мест.

Кроме того, требованиями [4–6] регламентируется деление спальных помещений на группы по 40 мест, каждая из которых должна иметь самостоятельные эвакуационные выходы.

Перечисленный выше комплекс требований не отражает влияния степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности зданий на допустимые число спальных мест и этажность зданий, что не дает возможность обеспечить его эффективное применение.

В частности, данные требования не позволяют однозначно определить степень огнестойкости спальных корпусов, необходимую для размещения 100 спальных мест, возможность строительства 2-этажных зданий спальных корпусов III степени огнестойкости и другое.

Вместе с тем практика противопожарной защиты учреждений отдыха детей и их оздоровления показала необходимость ограничивать число спальных мест (число детей) до величины не более 50 в помещениях зданий и сооружений IV и V степеней огнестойкости, а также класса конструктивной пожарной опасности C2 и C3, что нашло отражение в [8].

С учетом этого в рамках проведенных исследований разработаны новые требования к степени

огнестойкости, классу конструктивной пожарной опасности, этажности и площади этажа в пределах пожарного отсека зданий спальных корпусов в зависимости от числа спальных мест в здании (пожарном отсеке).

Согласно данным требованиям, быстровозводимые некапитальные и капитальные здания спальных корпусов, имеющие V–III степень огнестойкости, должны предусматриваться одноэтажными с площадью этажа в пределах пожарного отсека не более 1200 м².

Допустимое число спальных мест в данных зданиях в зависимости от степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности должно приниматься в соответствии с вновь разработанными требованиями, приведенными в таблице.

Капитальные здания спальных корпусов высотой два этажа должны проектироваться не ниже II степени огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности C0, а трехэтажные здания — I степени огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности C0. Для данных зданий необходимо обеспечить требования [4–6] в части ограничения числа спальных мест в пределах пожарного отсека — мест не более 160.

Для ограничения распространения пожара из горящих помещений в спальные помещения и на пути эвакуации разработаны новые, дополнительные относительно положений [9] требования в части пределов огнестойкости и классов пожарной опасности перегородок, отделяющих спальные помещения от смежных помещений и путей эвакуации. Согласно этим требованиям, в спальных корпусах перегородки, отделяющие пути эвакуации и между спальными помещениями, должны иметь следующие пределы огнестойкости и классы пожарной опасности:

- EI 15 класса K0 (15) в зданиях IV степени огнестойкости, с заполнением проемов противопожарными дверями 3-го типа;

Класс конструктивной пожарной опасности и степень огнестойкости в зависимости от числа спальных мест

Constructive fire hazard class and degree of fire resistance depending on the number of beds

Число спальных мест в пожарном отсеке Number of beds in the fire compartment	Класс конструктивной пожарной опасности Constructive fire hazard class	Степень огнестойкости, не ниже Degree of fire resistance, not lower
До 40 Up to 40	Не нормируется Not standardized	Не нормируется Not standardized
От 41 до 50 From 41 to 50	C0, C1	IV
От 51 до 160 From 51 to 160	C0, C1	III

- EI 45 класса K0 (45) в зданиях III–I степени огнестойкости, с заполнением проемов противопожарными дверями 2-го типа.

В зданиях с ненормируемой степенью огнестойкости и классом конструктивной пожарной опасности данные перегородки должны иметь класс пожарной опасности K0 (15). Двери в указанных перегородках следует оборудовать устройствами для самозакрывания и уплотнениями в притворах.

При этом усилие открывания дверных полотен, устанавливаемых в указанных противопожарных перегородках противопожарных дверей, а также дверей с устройствами для самозакрывания, не должно превышать 50 Н, что обеспечит их беспрепятственное открывание детьми.

С учетом положений [6] в зданиях спальных корпусов (класс функциональной пожарной опасности Ф1.1) всех степеней огнестойкости стены наружные с внешней стороны, в том числе с фасадными системами, должны иметь класс пожарной опасности K0, с применением негорючей (НГ) облицовки, отделки и теплоизоляции.

Если наружные стены в этих зданиях предусмотрены с применением горючих материалов, то по периметру оконных проемов необходимо предусмотреть противопожарные отсечки или противопожарные короба (согласно ТС на данные навесные фасадные системы). Для исключения распространения огня внутрь конструкций наружных стен из горючих материалов откосы оконных и наружных дверных проемов должны защищаться негорючими материалами толщиной не менее 25 мм или двумя листами ГКЛ [10].

Новые, разработанные с учетом положений [6, 10] требования предусматривают, что в спальных корпусах должны быть реализованы следующие конструктивные и объемно-планировочные решения.

Конструкции карнизов, подшивки карнизных свесов чердачных покрытий следует выполнять из НГ материалов, либо выполнять обшивку данных элементов листовыми НГ материалами. Для указанных конструкций не допускается использование горючих утеплителей (за исключением пароизоляции толщиной до 2 мм) и они не должны способствовать скрытому распространению горения.

Подвальные и цокольные этажи могут быть предусмотрены только в зданиях не ниже III степени огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности C0. При этом не допускается размещение в подвальных и цокольных этажах помещений класса Ф5 любого функционального назначения за исключением помещений категории В4 и Д для инженерного оборудования, предназначенного для технического обслуживания надземной части здания.

Для ограничения возможности перехода пожара из подземной части в надземную часть подвальные и цокольные этажи, а также технические подполья должны отделяться от надземной части объекта противопожарными перекрытиями 2-го типа класса K0.

Кроме того, предусмотрено, что при применении горючих материалов для теплоизоляции цоколей и надземной части фундаментов зданий на высоту не более 0,8 м от уровня земли или отмостки необходимо обеспечить их защиту с внешней стороны негорючими материалами толщиной не менее 30 мм в антивандальном исполнении (цементно-песчаной штукатуркой по сетке, керамической плиткой и т.п.).

Для исключения распространения огня и дыма между этажами по каналам и шахтам разработанными требованиями предусмотрено, что расположенные друг над другом на разных этажах помещения должны иметь самостоятельные вентиляционные каналы. При этом ограждающие конструкции каналов и шахт для прокладки коммуникаций должны соответствовать требованиям, предъявляемым к противопожарным перегородкам 1-го типа и перекрытиям 3-го типа, иметь класс K0 и выполняться из НГ материалов.

В спальных корпусах не допускается размещение складских и производственных помещений класса функциональной пожарной опасности Ф5, за исключением сушильной и кладовой инвентаря. Кладовая и сушильная должны выделяться противопожарными перегородками 2-го типа, а в зданиях III–I степени огнестойкости — перегородками 1-го типа.

Строительные конструкции не должны способствовать скрытому распространению горения. С этой целью не допускается в стенах, перегородках, покрытиях здания, а также в узлах их примыкания наличие пустот, ограниченных горючими материалами, за исключением пустот, соответствующих требованиям [6].

При реализации требований к классу пожарной опасности стен и перегородок необходимо учитывать результаты огневых испытаний, которые показали, что наиболее эффективным техническим решением по обеспечению класса пожарной опасности K0 (45) для стен и перегородок с применением деревянных конструкций является их облицовка двумя гипсокартонными листами согласно стандарту [11] или двумя плитами гипсовыми строительными по стандарту [12], а для обеспечения класса пожарной опасности K0 (15) — облицовка одним листом перечисленных выше материалов.

Применительно к каркасно-тентовым сооружениям новые разработанные требования предусматривают, что каждое каркасно-тентовое сооружение со спальными местами должно предусматриваться

площадью не более 30 м² и высотой не более 3 м. Тентовые ограждения этих сооружений должны выполняться на основе текстильных и полимерных материалов, соответствующих требованиям [13]. Пожарно-технические характеристики материалов каркасно-тентовых сооружений необходимо подтвердить соответствующими сертификатами.

Использование каркасно-тентовых сооружений и их частей для целей, не связанных с проживанием детей, а также размещение в группе с пребыванием детей каркасно-тентовых сооружений класса функциональной пожарной опасности Ф5 не допускается.

Обеспечение эвакуации и спасения детей

Особенности поведения детей при пожаре (в том числе в ночное время) усложняют возможность их организованной эвакуации. С учетом этого новыми разработанными требованиями предусмотрено ограничение числа спальных мест в спальнях помещений и ограничение длины пути эвакуации по коридорам, а также ограничение высоты размещения помещений для маломобильных групп населения (МГН) и детей младшего школьного возраста.

Согласно этим требованиям, каждое спальное помещение в капитальных и в быстровозводимых некапитальных спальнях корпусов должно быть предназначено для размещения не более пяти спальных мест. При этом спальные помещения для детей младшего школьного возраста допускается предусматривать не выше 1-го этажа.

Проектирование мероприятий по обеспечению эвакуации маломобильных детей в спальнях корпусов должно осуществляться в соответствии с [9, 14].

При этом разработанные требования предусматривают, что помещения, в которых предполагается размещение МГН группы мобильности М4, должны располагаться на первом этаже и иметь самостоятельные выходы наружу.

Разработанные требования по ограничению длины пути эвакуации в спальнях корпусов предусматривают, что расстояние от выхода из спального помещения до эвакуационного выхода наружу не должно превышать 10 м для помещений, расположенных между эвакуационными выходами, и 5 м для помещений, расположенных в тупиковой части для зданий V степени огнестойкости классов конструктивной пожарной опасности С0–С3 и для зданий класса конструктивной пожарной опасности С2–С3 любой степени огнестойкости.

Для зданий IV степени огнестойкости классов конструктивной пожарной опасности С0–С1 и для зданий класса конструктивной пожарной опасности С1 III степени огнестойкости расстояние от выхода из спального помещения до эвакуационного выхода наружу не должно превышать 15 м

для помещений, расположенных между эвакуационными выходами, и 7 м для помещений, расположенных в тупиковой части коридора.

Для зданий III степени огнестойкости классов конструктивной пожарной опасности С0 эти расстояния должны быть не менее 20 и 10 м соответственно.

В капитальных зданиях спальные помещения 1-го этажа должны иметь аварийные выходы наружу через окно, открытая створка (створки) которого образует проем размерами не менее 0,75 × 1,5 м.

Двух- и трехэтажные спальные корпуса необходимо делить на пожарные секции с числом спальных мест в каждой секции не более 40 (на каждом этаже) противопожарными перегородками 1-го типа. При этом, согласно [6], каждая пожарная секция должна иметь самостоятельные эвакуационные выходы. На верхних этажах эти выходы должны быть предусмотрены на лестничные клетки, обеспеченные выходами непосредственно наружу на 1-м этаже. При этом расстояние от выхода из спального помещения до эвакуационного выхода наружу или на лестничную клетку не должно превышать 20 м для помещений, расположенных между эвакуационными выходами, и 10 м для помещений, расположенных в тупиковой части коридора.

Для эвакуации из спальных корпусов наружу или с этажей на лестничные клетки необходимо предусматривать эвакуационные выходы шириной не менее 1,2 м каждый, а ширина эвакуационных коридоров должна предусматриваться не менее 1,2 м.

Отделка (облицовка) на путях эвакуации должна быть выполнена из НГ материалов, что следует подтвердить соответствующими сертификатами.

С целью обеспечения необходимого уровня безопасности детей при проектировании и эксплуатации подобных объектов должны быть соблюдены критерии своевременной и беспрепятственной эвакуации основного функционального контингента согласно ст. 53 № ФЗ-123, которые оцениваются на основании моделирования движения людских потоков и распространения опасных факторов пожара [15–17]. При этом стоит учитывать психофизические особенности поведения детей и движения людских потоков для адекватной оценки вероятности эвакуации с целью обоснования планировочных решений с точки зрения обеспечения безопасности людей при возникновении пожара [18–21].

Чтобы обеспечить возможность спасения детей в случае блокирования путей эвакуации (коридоров) опасными факторами пожара спальные помещения 2-го и 3-го этажей должны иметь аварийные выходы на балконы или галереи, ведущие в смежную пожарную секцию или в смежный пожарный отсек.

Для каркасно-тентовых сооружений разработаны следующие требования.

В каждом каркасно-тентовом сооружении должно быть предусмотрено не более шести спальных мест. При этом не допускается группирование более двух кроватей. Каждая кровать должна иметь не менее чем с одной продольной стороны проход шириной 0,7 м.

Доступ МГН в каркасно-тентовые сооружения не допускается.

Для срочного выхода детей из каркасно-тентового сооружения при пожаре следует исключить возможность фиксации внешнего полога тента, москитной сетки и других элементов наружного ограждения молниями, петлями с пуговицами и т.д.

С учетом этого новые разработанные требования предусматривают, что входные группы (входов, москитных сеток и другие) необходимо оснащать текстильными застежками типа «липучка», без применения молний, пуговиц и т.д.

Требования к инженерному оборудованию

Новыми дополнительными требованиями для капитальных и некапитальных быстровозводимых зданий спальных корпусов предусмотрено оборудование этих корпусов системой пожарной сигнализации (СПС) адресно-аналогового типа с использованием дымовых пожарных извещателей в соответствии с требованиями [22]. Данные системы позволяют идентифицировать место возникновения пожара и принять оптимальный алгоритм эвакуации детей.

Согласно разработанным требованиям, каркасно-тентовые сооружения должны оборудоваться СПС, запроектированными с применением беспроводных (радиоканальных) пожарных извещателей.

Вывод сигнала от СПС для этих зданий и сооружений должен быть предусмотрен в помещении диспетчерской с автоматическим дублированием сигнала о срабатывании систем противопожарной защиты в подразделение пожарной охраны с использованием системы передачи извещений о пожаре.

Разработанные требования предусматривают, что в спальных корпусах помещения сушильной и кладовой инвентаря должны быть оборудованы автоматическими установками пожаротушения. Допускается вместо автоматических установок пожаротушения применение автономных установок пожаротушения или сертифицированных устройств пожаротушения.

Для обеспечения требуемого уровня безопасности людей для зданий спальных корпусов необходимо предусмотреть их оборудование системой оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) при количестве спальных мест:

- до 100 — не ниже 2-го типа;

- от 101 до 160 — не ниже 3-го типа.

При применении 3-го типа СОУЭ оповещаются только работники учреждений при помощи специального текста оповещения. Такой текст не должен содержать слов, способных вызвать панику.

Группы каркасно-тентовых сооружений, а также отдельно стоящие сооружения, должны оснащаться устройствами (громкоговорителями или звукоусилительной аппаратурой), обеспечивающими подачу звукового (речевого) сигнала оповещения людей о пожаре. Включение указанных устройств должно осуществляться от датчиков СПС.

Наружное противопожарное водоснабжение для капитальных и некапитальных быстровозводимых зданий спальных корпусов необходимо проектировать в соответствии с положениями [2] и требованиями [23] для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1.1 исходя из объема пожарного отсека.

Требования к наружному противопожарному водоснабжению каркасно-тентовых сооружений необходимо предъявлять аналогично требованиям, предъявляемым к спальным корпусам (зданиям класса функциональной пожарной опасности Ф1.1). Группу каркасно-тентовых сооружений допускается рассматривать как единое сооружение. Это означает, что расстановка пожарных гидрантов на водопроводной сети должна обеспечивать подачу воды с расчетным расходом на пожаротушение любого сооружения не менее чем от двух гидрантов с учетом прокладки рукавных линий длиной не более 200 м по дорогам с твердым покрытием.

В капитальных и некапитальных быстровозводимых зданиях следует предусматривать устройство внутреннего противопожарного водопровода, проектируемого по [24] и обеспечивающего расход не менее 2,5 л/с от одного пожарного крана, который размещается в коридорах.

Внутренний противопожарный водопровод в быстровозводимых сооружениях допускается не предусматривать, при этом должно быть предусмотрено удвоенное относительно нормативных значений количество первичных средств пожаротушения (огнетушителей).

Для зданий спальных корпусов высотой 2 и 3 этажа удаление продуктов горения при пожаре системами вытяжной противодымной вентиляции следует предусматривать из эвакуационных коридоров, холлов и вестибюлей согласно положениям [25].

С целью обеспечения надежной работы противопожарных клапанов необходимо предусматривать автоматический контроль целостности линий электропитания и управления, состояние конечного положения заслонок (створок), с выдачей аварийного сигнала на пульт диспетчерской службы. Кроме того, интервал периодических испытаний систем приточно-

вытяжной противодымной вентиляции должен быть предусмотрен не реже 1-го раза в год.

Для капитальных и некапитальных быстровозводимых зданий спальных корпусов используемые электропроводки, кабельные изделия и электрооборудование должны соответствовать требованиями [2, 24, 25].

В каркасно-тентовых сооружениях запрещается прокладка электрических сетей, в том числе по их внешней поверхности, а также над и под ними.

Кроме того, в этих сооружениях не допускается применение газового оборудования, а также оборудования, в составе которого используются или хранятся горючие газы (ГГ), горючие жидкости (ГЖ) и легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ).

Организационно-технические мероприятия

Организационно-техническими мероприятиями должно предусматриваться создание и поддержание соответствующего противопожарного режима на объекте в соответствии с работой [8].

Лицо, ответственное за пожарную безопасность, организует в первый день пребывания детей проведение с ними противопожарного инструктажа и практических тренировок по эвакуации при каждом их заезде.

В местах отсутствия стационарных устройств телефонной связи дежурный персонал оснащается не менее чем двумя устройствами связи, обеспечивающими возможность сообщения о пожаре из любой точки данного объекта.

Территория, на которой устанавливаются каркасно-тентовые сооружения, а также территория, прилегающая к спальным корпусам, должна быть очищена от сухой травянистой растительности, пожнивных остатков, валежника, порубочных остатков, мусора и других горючих материалов, а также освещена в ночное время.

Освещенность каркасно-тентовых сооружений в ночное время следует осуществлять в соответствии с требованиями к освещенности основной территории у спальных корпусов.

Места применения на территории объекта открытого огня, а также места хранения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей должны определяться инструкцией о мерах пожарной безопасности, утверждаемой руководителем объекта.

В каждой группе каркасно-тентовых сооружений и каждом спальном корпусе должно быть предусмотрено ночное дежурство из расчета 1 воспитатель (вожатый) на 50 детей. Каждый дежурный воспитатель оснащается исправным ручным электрическим фонарем.

Дежурные воспитатели должны иметь табель, содержащий сведения о количестве детей и расположении их спальных мест. Указанные сведения уточняются ежедневно перед отбоем.

Ежедневно в ночное время суток организуются обходы территории расположения групп каркасно-тентовых сооружений.

В каркасно-тентовых сооружениях и спальных корпусах запрещается пользоваться открытым огнем, хранить легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, а также пиротехническую продукцию.

Не допускается устанавливать глухие решетки на окнах спальных помещений.

Каждая группа каркасно-тентовых сооружений должна быть обеспечена первичными средствами пожаротушения из расчета не менее четырех огнетушителей с рангом тушения модельного очага не ниже 2А. Первичные средства пожаротушения размещаются на противоположных сторонах группы палаток.

На территории каркасно-тентовых сооружений должен устанавливаться информационный стенд, на котором размещается информация о необходимости соблюдения Правил противопожарного режима на объекте.

Выводы

Проведены аналитические исследования по разработке новых, отсутствующих в нормативных документах требований к проектированию систем противопожарной защиты капитальных зданий спальных корпусов на территории стационарных организаций отдыха и оздоровления детей сезонного и круглогодичного функционирования, а также разработке новых современных требований к проектированию систем противопожарной защиты одноэтажных каркасно-тентовых и быстровозводимых некапитальных сооружений со спальными местами для детей.

При разработке требований учитывались специфические особенности поведения детей при пожаре, практика противопожарной защиты зданий с размещением детей IV и V степеней огнестойкости и зданий класса конструктивной пожарной опасности С2 и С3.

Для повышения безопасности детей разработаны требованиями предусмотрено ограничение мест в спальных помещениях, размещение спальных помещений для детей младшего школьного возраста и МГН группы мобильности М4 не выше 1-го этажа с устройством выходов наружу, а также ограничение длины пути эвакуации в спальных корпусах.

Кроме того, новыми требованиями предусмотрено, что для обеспечения необходимого уровня безопасности детей при проектировании и эксплуа-

тации подобных объектов должны быть обеспечены критерии своевременной и беспрепятственной эвакуации главного функционального контингента, которые оцениваются на основании моделирования движения людских потоков и распространения опасных факторов пожара. При этом следует учитывать психофизические особенности поведения детей и движения людских потоков для адекватной оценки вероятности эвакуации с целью обоснования планировочных решений с точки зрения обеспечения безопасности людей при возникновении пожара.

На основе исследований был подготовлен и введен в действие стандарт организации СТО 32313812-001–2023 «Одноэтажные каркасно-тентовые и быстровозводимые некапитальные сооружения, размещаемые на территориях детских лагерей, предназначенные для проживания детей. Требования пожарной безопасности».

Результаты исследований намечено внедрить в своды правил СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» и СП 1.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пехотилов А.В., Полетаев А.Н., Гомозов А.В., Усолкин С.В. Современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.5-14
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 14.07.2022). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям (Изменение № 3). URL: www.standards.ru
4. СНиП 2.08.02–89*. Общественные здания и сооружения.
5. СП 118.13330.2012*. Свод правил. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06–2009.
6. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: www.standards.ru
7. СП 118.13330.2022. Общественные здания и сооружения.
8. Правила противопожарного режима в Российской Федерации, утвержденные Постановлением Правительства Российской Федерации от 16.09.2020 № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации».
9. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: www.standards.ru
10. Пехотилов А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Голкин А.В. Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 28–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40
11. ГОСТ 6266–97. Листы гипсокартонные. Технические условия.
12. ГОСТ 32614–2012. Плиты гипсовые строительные. Технические условия.
13. ГОСТ Р 59567–2021. Палатки. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний на воспламеняемость.
14. СП 59.13330.2020. Свод правил. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01–2001.
15. Холицевников В.В., Парфёненко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 66–94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94
16. Парфёненко А.П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения при эвакуации // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2014. Вып. 12. С. 37–46.
17. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : 2-е изд., испр. и доп. М. : ВНИИПО, 2016. 79 с.
18. Парфёненко А.П. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. М. : АГПС МЧС России, 2012.
19. Холицевников В.В., Парфёненко А.П. Пожарная безопасность в строительстве. 2011. № 4. С. 49–61.
20. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.P. Study of children evacuation from pre-school education institutions // Fire and Materials Special Issue: Special Issue on Human Behaviour in Fire. 2012. Vol. 36. Issue 5–6. Pp. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152

21. Слюсарев С.В. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам для детей с ограниченными возможностями здоровья в зданиях с их массовым пребыванием : дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2016.
22. СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования. URL: www.standards.ru
23. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности. Изменение № 1. URL: www.standards.ru
24. СП 10.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Требования пожарной безопасности. Изменение № 1. URL: www.standards.ru
25. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Противопожарные требования. Изменение № 1. URL: www.standards.ru

REFERENCES

1. Pekhotikov A.V., Poletaev A.N., Gomofov A.V., Usolkin S.V. Modern requirements for the design of fire protection systems of educational organizations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.5-14 (rus).
2. Technical regulation on fire safety requirements. Federal Law of the Russian Federation dated July 22, 2008 No. 123-FZ (as amended on July 14, 2022). Access from the ConsultantPlus legal system. (rus).
3. SP 4.13130.2013 "Fire protection systems. Limiting the spread of fire at protected facilities. Requirements for space-planning and design solutions. (Change No. 3)". URL: www.standards.ru (rus).
4. SNiP 2.08.02–89*. Public buildings and structures. (rus).
5. SP 118.13330.2012*. Set of rules. Public buildings and structures. Updated edition of SNiP 31-06–2009. (rus).
6. SP 2.13130.2020. "Fire protection systems. Ensuring the fire resistance of objects of protection. Change 1". URL: www.standards.ru (rus).
7. SP 118.13330.2022. Public buildings and structures. (rus).
8. Rules of the fire regime in the Russian Federation, approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated September 16, 2020 No. 1479 "On approval of the Rules of the fire regime in the Russian Federation". (rus).
9. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. URL: www.standards.ru (rus).
10. Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Gomofov A.V., Golkin A.V. Modern requirements for fire protection of multi-apartment residential buildings using structures made of cross-laminated wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):28-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40 (rus).
11. GOST 6266–97. Plasterboard sheets. Specifications. (rus).
12. GOST 32614–2012. Gypsum building boards. Specifications. (rus).
13. GOST R 59567–2021. Tents. Fire safety requirements. Test methods for flammability. (rus).
14. SP 59.13330.2020. Set of rules. Accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. Updated edition of SNiP 35-01–2001. (rus).
15. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Correctness of the computer model and our life. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):66-94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94 (rus).
16. Parfenenko A.P. Methodology of modeling human flows and practice of programming their movement during evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2014; 12:37-46. (rus).
17. Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard. 2nd ed., Rev. and add. Moscow, VNIPO, 2016; 79. (rus).
18. Parfenenko A.P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits in buildings of preschool educational institutions : dis ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, AGPS EMERCOM of Russia, 2012. (rus).
19. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Evacuation of children from buildings of educational institutions. *Fire safety in construction*. 2011; 4:49-61. (rus).
20. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.P. Study of children evacuation from pre-school education institutions. *Fire and Materials Special Issue: Special Issue on Human Behaviour in Fire*. 2012; 36(5-6):349-366. DOI: 10.1002/fam.2152 (rus).
21. Slyusarev S.V. *Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits for children with disabilities in buildings with their mass stay : dis ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2016. (rus).
22. SP 484.1311500.2020. "Fire protection systems. Fire alarm systems and automation of fire protection systems. Norms and rules of design". URL: www.standards.ru (rus).
23. SP 8.13130.2020. "Fire protection systems. Sources of external fire water supply. Fire safety requirements. Change No. 1". URL: www.standards.ru (rus).

24. SP 10.13130.2020. "Fire protection systems. Internal fire water supply. Fire safety requirements. Change No. 1". URL: www.standards.ru (rus).
25. SP 7.13130.2013. "Heating, ventilation and air conditioning. Fire safety requirements. Change No. 1". URL: www.standards.ru (rus).

Поступила 03.05.2023, после доработки 29.05.2023;

принята к публикации 13.09.2023

Received May 3, 2023; Received in revised form May 29, 2023;

Accepted September 13, 2023

Сведения об авторах

ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, 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; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, 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; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

ГОЛКИН Алексей Викторович, заместитель начальника отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, 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; ORCID: 0000-0003-2940-0633; e-mail: 2102pro@mail.ru

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, 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; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

Alexander A. ABASHKIN, Head of Fire Modeling and Custom Design Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

Aleksey V. GOLKIN, Deputy Head of Fire Modeling and Custom Design Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2940-0633; e-mail: 2102pro@mail.ru

Alexander V. GOMOZOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий

Наталья Ивановна Константинова¹, Андрей Владимирович Зубань¹✉,
Борис Борисович Серков², Николай Витальевич Голов¹

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 Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Текстильные ковровые покрытия, достаточно широко используемые для покрытий полов общественных и жилых зданий, при интенсивном тепловом воздействии, как правило, являются пожароопасными материалами. В то же время нормативные требования применения напольных ковровых покрытий (НКП) в общественных зданиях ограничивают применение пожароопасных материалов, в связи с чем необходимо проводить мероприятия по их огнезащите. Однако требования к средствам огнезащиты текстильных материалов отсутствуют, поэтому актуальной задачей является разработка технической документации на средства и технологию их нанесения для эффективной огнезащиты текстильных ковровых покрытий.

Методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований по изучению факторов, влияющих на пожарную опасность НКП, в том числе огнезащищенных, использовались стандартные методы оценки критической плотности падающего теплового потока воспламенения (ГОСТ 30402), распространения пламени по поверхности (ГОСТ Р 51032), дымообразующей способности и токсичности продуктов горения (ГОСТ 12.1.044.89 (п.п. 4.18, 4.20)).

Результаты и их обсуждение. Проведен анализ структуры и химического состава составляющих элементов НКП, влияющих на пожароопасные характеристики материала.

Установлено, что наименьшую пожарную опасность представляют ковровые покрытия, в состав которых входят огнезащищенные на стадии их производства волокна.

Применяемые в настоящее время средства по механизму действия огнезащиты обычно распространяются только на определенный вид волокон ворса.

Экспериментально показано значительное снижение эффекта огнезащиты НКП поверхностно обработанными защитными средствами после сухих и, особенно, влажных чисток.

Выявлена необходимость обязательного учета ряда факторов при выборе средства для их эффективной огнезащиты на объектах и процедуры оценки их соответствия.

Выводы. Огнезащитные составы (ОС) должны разрабатываться для конкретного типа ковровых покрытий в зависимости от их структуры и химического состава основы и волокон ворса, а эффективность их действия должна приводить к обеспечению НКП соответствия существующим требованиям нормативных документов по пожарной безопасности в зависимости от области применения.

Ключевые слова: антипирен; волокна; показатели пожарной опасности; подтверждение соответствия; техническая документация

Для цитирования: Константинова Н.И., Зубань А.В., Серков Б.Б., Голов Н.В. Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 16–25. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.16-25

✉ Зубань Андрей Владимирович, e-mail: avzuban@mail.ru

Fire protection of floor carpets

Nataliya I. Konstantinova¹, Andrey V. Zuban¹✉, Boris B. Serkov², Nikolay V. Golov¹

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

² 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

Introduction. Textile carpets, widely used for floor coverings of public and residential buildings are usually fire-hazardous materials under intense heat exposure. Regulatory requirements for the use of floor carpet cove-

rings (FCC) in public buildings limit the use of fire-hazardous materials, and therefore it is necessary to carry out measures for their fire protection. However, there are no requirements for the means of fire protection of textile materials, so, an urgent task is to develop technical documentation for the means and technology of their application for effective fire protection of textile carpet coverings.

Research methods. Standard methods of estimation of the critical density of the incident heat flux of ignition (GOST 30402), flame propagation on the surface (GOST R 51032), smoke-forming ability and toxicity of combustion products (GOST 12.1.044.89 (p.p. 4.18, 4.20)) were used for experimental studies on the factors influencing the fire hazard of FCC, including fire-protected ones.

Research results and their discussion. The analysis of the structure and chemical composition of the constituent elements of FCC, which influence the fire hazard characteristics of the material, was carried out.

It is established that the lowest fire hazard is represented by carpet coverings, which include fire-protected fibers at the stage of their production.

Currently used means by the mechanism of action of fire protection usually apply only to a certain type of pile fibers. Experimentally shown a significant decrease in the effect of flame retardancy of FCC by surface-treated protective agents after dry and wet cleaning.

The necessity of mandatory consideration of a number of factors in the choice of means for their effective fire protection at facilities and procedures for assessing their compliance was revealed.

Conclusions. Flame retardant compositions should be developed for a specific type of carpeting, depending on its structure and chemical composition of the base and pile fibers, and the effectiveness of their action should lead to ensuring compliance with the existing requirements of fire safety regulations, depending on the field of application.

Keywords: flame retardant; fibers; fire hazard indicators; confirming compliance; technical documentation

For citation: Konstantinova N.I., Zuban A.V., Serkov B.B., Golov N.V. Fire protection of floor carpets. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):16-25. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.16-25 (rus).

✉ Andrey Vladimirovich Zuban, e-mail: avzuban@mail.ru

Введение

Напольные ковровые покрытия (НКП) достаточно широко применяются в помещениях общественных, административных, жилых зданий и оптимально сочетают в себе функциональные и эксплуатационные свойства, основными из которых являются поглощение шума и звукоизоляция.

Однако традиционные материалы (шерсть, полиамид, нейлон, полипропилен и др.), используемые для изготовления ковровых покрытий, весьма пожароопасны, и в условиях огневого воздействия способны воспламеняться, распространять пламя по поверхности, выделять дым и токсичные продукты горения.

В зависимости от области применения (помещения зданий и сооружений, различные виды транспорта и прочее) установлены нормативные требования пожаробезопасного применения НКП и методы оценки показателей их пожарной опасности, таких как распространение пламени, устойчивость к воздействию теплового потока, дымообразование и токсичность продуктов горения или терморазложения. Как правило, по показателям пожарной опасности многие представители НКП не соответствуют существующим нормативным требованиям, и без проведения процедуры огнезащиты применение их весьма ограничено в помещениях зданий с массовым пребыванием людей и на транспорте.

Однако требований в отечественной практике к применяемым в настоящее время средствам огне-

защиты для текстильных материалов, в том числе для НКП, не установлено.

Поэтому актуальной задачей является разработка технической документации на средства и технологию их нанесения для эффективной огнезащиты текстильных ковровых покрытий.

Методы исследования

Экспериментальные исследования показателей пожарной опасности образцов ковровых покрытий, различных по количественному и химическому составу волокон ворса, его высоты и плотности, а также степени огнезащиты, проводились в испытательных лабораториях ФГБУ ВНИИПО МЧС России и АГПС МЧС России.

Экспериментальные исследования по определению критической поверхностной плотности теплового потока (КППТП), при которой происходит воспламенение НКП, проводились с использованием метода испытаний и средств измерений в соответствии с ГОСТ 30402–96¹. Образец коврового покрытия размером 165 × 165 мм подвергался воздействию лучистого теплового потока с поверхностной плотностью от 5 до 20 кВт/м². За КППТП принималось ее минимальное значение, при котором отмечалось наличие устойчивого пламенного горения [1].

Оценка распространения пламени по горизонтальной поверхности проводилась с использованием метода и средств измерений согласно

¹ ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.

ГОСТ Р 51032–97². Для исследований использовались образцы размером 1100 × 250 мм с подложкой, предусмотренной стандартом. Токсичность продуктов горения и дымообразующая способность образцов НКП оценивались стандартными методами и средствами измерений согласно ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.18 и 4.20)³.

Результаты исследований и их обсуждение

Учитывая зарубежный опыт производства и использования огнезащищенных текстильных ковровых покрытий, можно сделать следующее обобщенное заключение.

В большинстве своем огнезащита ковровых покрытий осуществляется на стадии их производства путем использования различного рода выпускаемых фирмами комплексных антипиренов, которые содержат соединения брома и хлора, фосфор, азот (на основе меламина) или бораты.

Причем специализированными компаниями разработан перечень антипиренов, которые запрещено использовать при производстве текстильных напольных покрытий для гарантии соответствия любых производимых ковров требуемым стандартам пожарной безопасности при одновременном отсутствии каких-либо веществ, наносящих вред потребителю или окружающей среде. На сегодняшний день самой многочисленной группой применяемых антипиренов являются неорганические соединения [2, 3].

В российской нормативной практике требований к средствам обеспечения пожарной безопасности текстильных материалов и к их маркировке до настоящего времени не установлено, и в действующем с 1 января 2020 г. ТР ЕАЭС 043/2017⁴ не приведено какой-либо информации о технических показателях, характеризующих средства эффективной огнезащиты.

Отсутствие регулирования использования огнезащиты нередко приводит к применению неэффективных составов для поверхностной обработки, а значит возможности возгорания НКП. Поэтому важной и актуальной задачей является разработка нормативной документации, регламентирующей выбор составов для эффективной огнезащитной поверхностной обработки НКП, учитывающей многообразие факторов, влияющих на их пожарную опасность [4].

² ГОСТ Р 51032–97. Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени.

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

⁴ ТР ЕАЭС 043/2017. О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456080708>

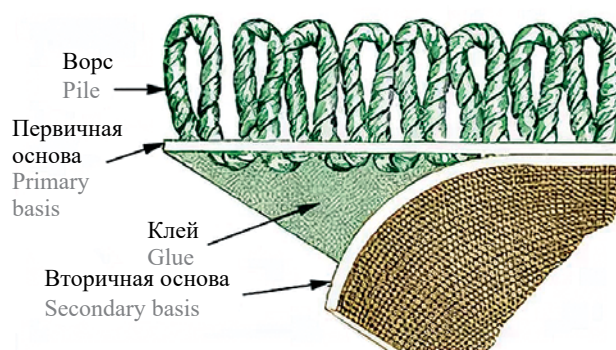


Рис. 1. Структура коврового текстильного покрытия

Fig. 1. Structure of carpet textile covering

К изделиям и предметам из текстиля для применения на различных видах транспорта (на морских и речных судах, вагонах железнодорожного транспорта и т.д.) предъявляются достаточно жесткие комплексные требования пожаробезопасности, исключающие использование легковоспламеняемых материалов с высокой дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения, и для оценки соответствия указанных требований используются различные методы испытаний⁵.

В зданиях различного класса функциональной пожарной опасности нормирование НПК осуществляется согласно требованиям ФЗ 123 (табл. 28, 29)⁶.

Составление и включение полной и объективной информации в техническую документацию на огнезащитные средства для эффективной огнезащиты НКП является отдельной важной задачей.

На рис. 1 представлена в общем виде структура коврового покрытия, состоящего из следующих слоев: ворс, первичная основа, закрепляющий слой и вторичная основа.

Ворс текстильного коврового покрытия имеет множество различных видов по химическому составу нитей (волокон): их плотности, технологии изготовления (например, разрезной, петлевой или комбинированный ворс) и высоте. Химический состав ворса коврового покрытия может состоять из натуральных волокон: шерсть, шелк, хлопок, джут, сизаль, лен; искусственных — целлюлозных (вискоза) и синтетических — полипропилен, полиэтилен, полиэфиры, полиамиды, полиакрилонитрил.

Первичная основа используется в ковровом покрытии для закрепления ворса и обеспечивает стабильность формы. Для превращения «полуготового» коврового покрытия в пригодное к использованию изделие необходимо прочно зафиксировать

⁵ Российский морской регистр судоходства. Российский Речной Регистр. ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава».

⁶ ФЗ 123 от 22.07.2008. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

нити коврового ворса, для чего наносят специальный закрепляющий состав (клеящий компаунд).

В качестве клеящего компаунда могут быть использованы различные латексы — на основе поливинилацетата, поливинилхлорида, полиуретана, полиакрилата. Кроме фиксации петель латексирование имеет большое значение для придания прочности покрытию, так как ковровое покрытие подвергается значительным нагрузкам в процессе эксплуатации.

После нанесения закрепляющего слоя устраивается вторичная основа — видимый с изнанки слой, который будет непосредственно соприкасаться с полом. Она придает ковровому покрытию дополнительные качества — сопротивление усадке, упругость, эластичность, износостойкость, звуко- и теплоизоляцию, сопротивление скольжению. Существуют следующие основные виды вторичной основы: натуральный джут, искусственный джут, войлок, тканевая основа, резина, а также поливинилхлорид и битум для модульных ковровых изделий (ковровая плитка) и другие.

Таким образом, каждый из перечисленных многообразных элементов, составляющих ковровые покрытия, может влиять на пожароопасные характеристики материала, поэтому выбор замедлителей горения и технологии их нанесения является весьма сложной задачей, требующей для решения индивидуального подхода к каждому виду коврового покрытия.

Вопросы огнезащиты текстильных материалов рассматриваются в работах многих авторов [5–7]. Также внимание ученых направлено на изучение методологии испытаний текстильных материалов и изделий, разработку ассортимента текстильной продукции пониженной пожарной опасности [8–10], однако остается достаточно много не решенных задач, связанных, например, с возможностью эффективной огнезащиты НКП на объектах.

В табл. 1 представлены численные диапазоны значений параметров токсичности продуктов горения и коэффициентов дымообразования в режимах тления и горения различных по химическому составу волокон ворса ковровых покрытий. Из представленных данных следует, что материал ворса исследуемых НКП относится к высокоопасным материалам по показателю токсичности продуктов горения (группа Т3), с высокой дымообразующей способностью (группа Д3), кроме того, указанные виды материалов ворса имеют величину критической поверхностной плотности теплового потока менее 20 кВт/м^2 и относятся к группе легковоспламеняемых (группа В3) согласно ГОСТ 30402–96¹ и нередко к быстро распространяющим пламя по поверхности согласно методу ГОСТ Р 51032².

В табл. 2 представлены показатели пожарной опасности различных по составу ковровых покры-

Таблица 1. Параметры токсичности продуктов горения и дымообразующей способности некоторых видов волокон ворса ковровых покрытий

Table 1. Parameters of toxicity of combustion products and smoke-producing capacity of some types of fibers of pile of carpet coverings

Состав ворса Pile composition	Количественный выход газообразных продуктов горения, мг/г Quantitative yield of gaseous combustion products, mg/g		Коэффициент дымообразования $D_{\text{ср}}$, кг/м ² Smoke generation coefficient D_{av} , kg/m ²	
	CO	CO ₂	тления smouldering	горения combustion
Хлопок Cotton	140–200	160–180	1200–1400	700–900
Полиамид Polyamide	140–155	340–370	800–900	600–700
Шерсть Wool	140–210	700–1100	500–900	300–500
Полиэфир Polyester	160–200	1420–1500	1200–1400	1000–1100
Полипропилен Polypropylene	140–220	1400–1500	1100–1700	600–700

тий с петлевым ворсом, на джутовой основе и полипропиленовой прошивной нитью. Установлено, что наименьшую пожарную опасность представляют ковровые покрытия, в состав которых входят огнезащищенные на стадии их производства волокна. НКП без огнезащиты имеют, как правило, высокую дымообразующую способность, показатель токсичности продуктов горения по численному значению близок к предельному — высокоопасному, быстро распространяют пламя по поверхности, а по уровню КПППТ имеют диапазон численных значений 8–15 кВт/м².

Достичь требуемого нормативного уровня соответствия комплексу показателей пожарной опасности текстильного коврового покрытия представляется весьма проблематичной задачей, поскольку необходимо использование для поверхностной обработки огнезащитных средств, одновременно эффективно снижающих комплекс пожароопасных свойств определенного по структуре и составу коврового покрытия.

Применяемые в настоящее время средства по механизму действия огнезащиты обычно распространяются только на определенный вид волокон ворса. Огнезащитные пропиточные составы наносятся путем поверхностной обработки и окунания в раствор средства, одностороннего, двухстороннего напыления одного и (или) нескольких составов, иногда механизированного втирания в основу

Таблица 2. Результаты сравнительных исследований свойств пожарной опасности образцов напольных ковровых покрытий
Table 2. Results of comparative studies of fire hazard properties of carpet floor covering samples

Ковровое покрытие Carpet covering	Состав ворса Pile composition	Высота ворса, мм Pile height, mm	Вес, г/м ² Weight, g/m ²	ГОСТ 30402 ¹ . Группа В (КПТП), кВт/м ² GOST 30402 ¹ . Group V (KPPT), kW/m ²	ГОСТ 51032 ² . Группа РП (КППТ), кВт/м ² GOST 51032 ² . Group RP (KPPT), kW/m ²	ГОСТ 12.1.044–89 ³ GOST 12.1.044–89 ³	
						D_{cp} , м ² /кг D_{av} , м ² /kg	HCL ₅₀ , г/м ³ HCL ₅₀ , g/m ³
Ковер жаккардовый двухполотный Jacquard double carpet	99 % шерсть 99 % wool	9	2650	B3 (10,0) V3 (10.0)	РП4 (4,8) RP4 (4.8)	640	39 ± 2
Ковер жаккардовый двухполотный Jacquard double carpet	40 % шерсть, 60 % ПАН 40 % wool, 60 % PAN	5	2100	B3 (7,5) V3 (7.5)	РП4 (3,2) RP4 (3.2)	780	37 ± 2
Ковровое покрытие Carpet covering	100 % полипропилен 100 % polypropylene	5	1300	B3 (8,3) V3 (8.3)	РП4 (4,2) RP4 (4.2)	815	35 ± 2
Ковровое покрытие Carpet covering	100 % полиамид 100 % polyamide	3	1100	B3 (15,0) V3 (15.0)	РП3 (5,1) RP3 (5.1)	750	40 ± 2
Ковровое покрытие Carpet covering	50 % шерсть с ОС, 50 % ПАН 50 % wool with backing, 50 % PAN	4	2350	B2 (20,2) V2 (20.2)	РП1 (>11) RP1 (>11)	480	42 ± 2

или в ворсовую часть ковра и другими возможными комбинированными методами.

Механизм действия огнезащитных систем для различного рода полимерных волокон достаточно хорошо изучен. Термические характеристики волокон различны, поэтому для достижения эффективности огнезащиты учитывается химический состав антипиренов и их влияние на различные стадии термолитиза полимера [11–13].

В случае карбонизирующихся волокнистых полимеров (шерсть, хлопок) при горении на поверхности твердой фазы происходит накопление коксового остатка, что приводит к непрерывному изменению условий тепло- и массообмена в конденсированной фазе, т.е. уменьшается выход легколетучих горючих углеводородов в продуктах пиролиза, а образующийся кокс экранирует полимер от теплового потока и пламени, снижает температуру поверхности материала, затрудняет выход горючих газообразных продуктов в зону горения [14–16].

К наиболее применяемым в данном случае средствам огнезащиты относятся различные комбинации буры и борной кислоты, фосфор-, фосфоразот- и фосфоргалогенсодержащие соединения [17, 18].

При термоокислительном разложении таких полимеров, как полиамид, полипропилен и других, образуется значительное количество летучих, в том числе горючих, продуктов, попадающих в газовую фазу горения. В результате интенсивного протекания окислительных процессов в газовой фазе выделяется значительное количество тепла, способствующего устойчивому горению полимера. Следовательно, для эффективного ингибирования процесса горения необходимо уменьшить возможность протекания окислительных процессов в газовой фазе за счет уменьшения количества выделившейся энергии и концентрации горючих продуктов термолитиза, а также обеспечения ингибирования радикальных процессов при горении. В данном случае преимущественно для подавления термоокислительных процессов используются галогенсодержащие или комплексные соединения [19–22].

В работе [4] авторами уже рассматривались вопросы проведения огнезащиты текстильных материалов, однако НКП имеют существенные структурные различия, и требования к средствам огнезащиты для достижения требуемого эффекта более масштабны.

Наличие композиционного сочетания различных по химическому составу полимеров в ковровом покрытии создает дополнительные сложности при разработке рецептур ОС, эффективно действующих на подавление процесса горения комплексного материала.

Результаты анализа информации, представленной в технической документации наиболее часто используемых средств для проведения огнезащитных работ на объектах с ковровыми покрытиями, свидетельствуют о недостаточной ее полноте, а в некоторых случаях объективности.

Например, в технической документации и сертификатах подтверждения соответствия требованиям пожарной безопасности в обязательной или добровольной форме большинства огнезащитных составов для НКП (в статье не приводятся их коммерческие наименования) не указывается композиционный состав ковров, характеристики ворса, устойчивость к различным чисткам и прочему, что ставит под сомнение эффективность их действия в процессе эксплуатации.

По предварительной оценке при эксплуатации в зданиях и сооружениях у НКП, обработанных огнезащитными пропиточными составами, по прошествии определенного времени происходит заметное снижение эффективности огнезащиты и увеличение их пожароопасности. Ковровые покрытия в процессе эксплуатации обязательно подвергаются сухой, влажной или химической чисткам, т.е. комплексу физико-химических и механических процессов и операций, обеспечивающих удаление загрязнений с изделий, в том числе в среде различных растворителей.

Для исследований по оценке сохранения эффективности огнезащиты НКП после чисток были проведены эксперименты по определению устойчивости к воздействию теплового потока огнезащищенного различными средствами ковра после проведения сухих чисток. Для сравнения было выбрано 2 сертифицированных огнезащитных средства для ковровых покрытий (№ 1 и 2) и произведена ими огнезащита коврового покрытия с ворсом из смешанных шерстяных волокон (позиция 4 табл. 2). Также воспроизведена, согласно действующим инструкциям по применению, технология их нанесения (пропитка с указанным расходом методом распыления до полного увлажнения). Чистки производились в сухом отапливаемом помещении с помощью вертикального пылесоса со средней мощностью всасывания раз в семь суток. Полученные зависимости критической поверхностной плотности теплового потока воспламенения (КППТП) от кратности чисток представлены на рис. 2.

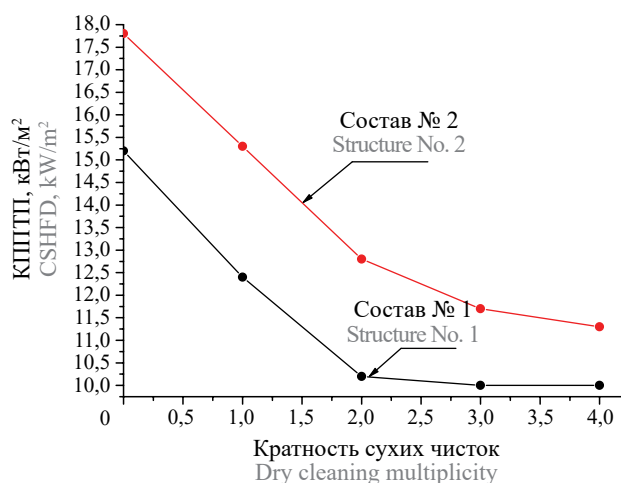


Рис. 2. Зависимость критической поверхностной плотности теплового потока воспламенения напольных ковровых покрытий от кратности чисток

Fig. 2. The dependence of critical surface heat flux density of floor carpets on the frequency of cleaning

Из полученных данных следует, что при высыхании раствора огнезащитного средства возможна миграция сухого остатка антипирена на поверхность ворса ковра с последующим его удалением при работе пылесоса, что в значительной степени снижает эффект огнезащиты. Можно предположить, что использование мокрой или химической чисток огнезащищенных пропиточными составами НКП будет еще в большей мере снижать эффект огнезащиты используемых изделий и повышать их пожарную опасность.

Для сравнения полученных данных были проанализированы результаты исследований образцов коврового покрытия из огнезащищенных волокон ворса (позиция 5 табл. 2), у которых изменение значений КППТП практически не происходило и оставалось в пределах численных значений 20,0–20,2 кВт/м².

Из полученных результатов исследований следует необходимость периодической повторной обработки огнезащитными составами НКП, находящихся в эксплуатации с целью сохранения уровня пожарной безопасности первично обработанного напольного покрытия, а также контроля качества повторной обработки.

Кроме того, при этом необходимо определить периодичность, совместимость и технологические параметры последующей обработки с их первичными средствами.

Безусловно, целесообразнее использовать на объектах, где предъявляются нормативные требования к пожаробезопасному применению НКП, ковровые изделия, огнезащита которых произведена на стадии их производства (как правило, использование модифицированных антипиренами

волокон ворса). Кроме соответствия установленным требованиям пожарной безопасности, такие НКП устойчивы практически ко всем видам чисток и сохраняют внешний вид и эксплуатационные свойства на весь период их эксплуатации.

По мнению авторов, поверхностную огнезащитную обработку преимущественно следует осуществлять для НКП во временных выставочных пространствах и в зданиях и сооружениях для обеспечения пожарной безопасности проведения мероприятий с массовым пребыванием людей.

Таким образом, данные проведенных исследований пожарной опасности ковровых покрытий выявили необходимость обязательного учета ряда факторов при выборе средства для их эффективной огнезащиты на объектах.

Процедура оценки соответствия средств огнезащиты обязательно должна учитывать многочисленные особенности поведения НКП в присутствии замедлителей горения при тепловом воздействии, а для выбора и использования эффективных средств техническая документация на них должна содержать наиболее полную информацию, характеризующую химические и физические свойства объекта защиты, область применения, технологию обработки, устойчи-

вость к чисткам, периодичность и параметры последующей обработки, условия и срок эксплуатации огнезащищенных материалов.

Выводы

Анализ нормативно-технической информации по вопросам огнезащиты текстильных ковровых покрытий и проведенные экспериментальные исследования позволили сделать следующее заключение.

ОС должны разрабатываться для конкретного типа ковровых покрытий в зависимости от их структуры и химического состава основы и волокон ворса.

Эффективность действия ОС должна приводить к обеспечению НКП соответствия существующим требованиям пожарной безопасности нормативных документов в зависимости от области применения.

Осуществление поверхностной обработки на объектах и процедура подтверждения соответствия требованиям пожарной безопасности вызывает необходимость в разработке нормативно-технических документов на средства огнезащиты именно для ковровых изделий, учитывающих многочисленные факторы, влияющие на эффективность защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Корольченко О.Н., Цариченко С.Г., Константинова Н.И.* К вопросу о свойствах пожарной опасности огнезащищенной древесины // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2021. Т. 30. № 2. С. 23–34. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.23-34
2. *Anju Singh.* Flame Retardant Finishes in Textile: Mechanism, Chemicals and Application // *Pursuing M. Sc. in Fabric and Apparel Science Delhi University*. India, 2013.
3. *Yusuf M.* A review on flame retardant textile finishing: current and future trends // *Current Smart Materials*. 2018. Vol. 3. No. 2. Pp. 99–108. DOI: 10.2174/2405465803666180703110858
4. *Константинова Н.И., Зубань А.В.* О требованиях к проведению огнезащиты текстильных материалов // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 1. С. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022
5. *Konstantinova N., Eremina T., Kuznetsova I.* Study of fireproof properties of textile materials safe when in contact with human skin // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019. Vol. 97. P. 03013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703013
6. *Бесишапошникова В.И.* Научные основы и инновационные технологии огнезащиты текстильных материалов : монография. М. : РИО РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. 188 с. ISBN: 978-5-87055-679-6
7. *Спиридонова В.Г., Ульева С.Н., Никифоров А.Л.* Применение антипиренов для придания огнезащитных свойств текстильным материалам // *Пожарная и аварийная безопасность*. 2018. С. 231–233.
8. *Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А.* Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 2. С. 22–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32
9. *Choudhury A.K.R.* Flame retardants for textile materials // *CRC Press*. 2020. DOI: 10.1201/9780429032318
10. *Спиридонова В.Г.* Исследование пожароопасных свойств текстильных материалов из целлюлозных волокон и совершенствование методов их оценки : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022.
11. *Бычкова Е.В., Щербина Н.А.* Влияние условий модификации на процессы пиролиза полиакрилонитрильного волокна : сб. мат. IX Междунар. конф. «Композит-2022» «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология». 2022. С. 12–15.
12. *Назарович А.Н.* Исследование механизма огнезащитного действия неорганических замедлителей горения, хемосорбированных на полиэфирном волокне // *Полимерные материалы и технологии*. 2021. Т. 7. № 1. С. 91–98. DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-91-98

13. Tausarova B., Baiimbetova G. Fire-retardant properties of cellulose textile materials with the use of sol-gel technology // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. No. 58 (1). Pp. 50–54. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-58-1-50-54
14. Микрюкова О.Н. Разработка и исследование свойств огнезащитных текстильных материалов и пакетов спецодежды : дис. ... канд. техн. наук. 2018.
15. Lin X.D. et al. Smart Efficient Flame Retardant Carpets in Non Halogen Flame Retardant Polymers // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 650. Pp. 279–284. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.650.279
16. Константинова Н.И., Зубань А.В., Нугматуллина Д.М., Корольченко О.Н. Исследование пожарной опасности текстильных материалов и изделий, используемых на пассажирских речных судах // *Речной транспорт (XXI век)*. 2022. № 4 (104). С. 35–38.
17. Pal A. et al. A Review on Fire Protective Functional Finishing of Natural Fibre Based Textiles : Present Perspective // *Cellulose*. 2020. Vol. 360. 370 p. DOI: 10.19080/CTFTTE.2020.07.555705
18. Kundu C.K. et al. Flame Retardant Treatments of Nylon Textiles: A Shift towards Eco-Friendly Approaches // *Flame Retardant and Thermally Insulating Polymers*. In tech Open, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.94880
19. Бесишапошникова В.И., Лебедева Т.С., Загоруйко М.В. Огнезащитная модификация фогинолом-2 полиакрилонитрильных волокнистых материалов // *Материалы и технологии*. 2019. № 1 (3). С. 26–30. DOI: 10.24411/2617-149X-2019-11004
20. Коваленко Г.М., Бокова Е.С. Импрегнирование текстильных материалов огнезащитными составами на основе интерполимерных комплексов // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2015. № 6 (360). С. 221–226.
21. Lau C., Mi Y. A study of blending and complexation of poly (acrylic acid)/poly (vinyl pyrrolidone) // *Polymer*. 2002. No. 43. Pp. 823–829.
22. Бесишапошникова В.И., Хамматова В.В., Лебедева Т.С., Мерзликина Т.В. Огнезащита синтетических волокон и тканей. В сб. : Актуальные проблемы экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции текстильной и легкой промышленности // *Сб. трудов по итогам работы Круглого стола с международным участием*. 2021. С. 47–51.

REFERENCES

1. Korolchenko O.N., Tsarichenko S.G., Konstantinova N.I. Flammability properties of fire-retardant timber. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(2):23-34. (rus).
2. Anju Singh. Flame Retardant Finishes in Textile: Mechanism, Chemicals and Application. *Pursuing M. Sc. in Fabric and Apparel Science Delhi University*. India, 2013.
3. Yusuf M. A review on flame retardant textile finishing: current and future trends. *Current Smart Materials*. 2018; 3(2):99-108.
4. Konstantinova N.I., Zuban' A.V. About the requirements for conducting fire protection of textile materials. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti/Occupational Safety in Industry*. 2022; 1:57-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022 (rus).
5. Konstantinova N., Eremina T., Kuznetsova I. Study of fireproof properties of textile materials safe when in contact with human skin. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019; 97:03013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703013
6. Besshaposhnikova V.I. *Scientific foundations and innovative technologies of fire protection of textile materials : monografiya*. Moscow, RIO Russian State University named after A.N. Kosygin, 2018; 188. ISBN: 978-5-87055-679-6 (rus).
7. Spiridonova V.G., Ul'eva S.N., Nikiforov A.L. The use of flame retardants to impart flame-retardant properties to textile materials. *Pozharnaya i avarijnaya bezopasnost'/Fire and emergency safety*. 2018; 231-233. (rus).
8. Konstantinova N.I., Zuban' A.V., Bulgakova A.A. Improvement of methodological approach to assessment of fire hazard of mattresses. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):22-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32 (rus).
9. Choudhury A.K.R. Flame retardants for textile materials. *CRC Press*. 2020. DOI: 10.1201/9780429032318
10. Spiridonova V.G. *Investigation of fire-hazardous properties of textile materials made of cellulose fibers and improvement of methods of their assessment : dissertation ... candidate of technical sciences*. Ivanovo, 2022. (rus).
11. Bychkova E.V., Sherbina N.A. *Influence of modification conditions on the pyrolysis processes of polyacrylonitrile fiber : collection of materials of the IX International Conference "Composite-2022" "Promising polymer composite materials. Alternative technologies. Recycling. Application. Ecology"*. 2022; 12-15. (rus).
12. Nazarovich A.N. Investigation of the mechanism of fire-retardant action of inorganic gorenje retardants chemisorbed on polyester fiber. *Polimernye materialy i tekhnologii/Polymer materials and technologies*. 2021; 7(1):91-98. DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-91-98 (rus).
13. Tausarova B., Baiimbetova G. Fire-retardant properties of cellulose textile materials with the use of sol-gel technology. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021; 58(1):50-54. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-58-1-50-54

14. Mikryukova O.N. *Development and research of properties of flame-retardant textile materials and workwear packages : dissertation ... candidate of technical sciences*. 2018. (rus).
15. Lin X.D. et al. Smart Efficient Flame Retardant Carpets in Non Halogen Flame Retardant Polymers. *Advanced Materials Research*. 2013; 650:279-284. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.650.279
16. Konstantinova N.I., Zuban' A.V., Nigmatullina D.M., Korol'chenko O.N. Investigation of fire hazard of textile materials and products used on passenger river vessels. *Rechnoj transport (XXI vek)/River transport (XXI century)*. 2022; 4 (104):35-38. (rus).
17. Pal A. et al. A Review on Fire Protective Functional Finishing of Natural Fibre Based Textiles: Present Perspective. *Cellulose*. 2020; 360:370. DOI: 10.19080/CTFTTE.2020.07.555705
18. Kundu C.K. et al. Flame Retardant Treatments of Nylon Textiles: A Shift towards Eco-Friendly Approaches. *Flame Retardant and Thermally Insulating Polymers*. In tech Open, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.94880
19. Besshaposhnikova V.I., Lebedeva T.S., Zagorujko M.V. Flame retardant modification of foginol-2 polyacrylonitrile fibrous materials. *Materialy i tekhnologii/Materials and technologies*. 2019; 1(3):26-30. (rus).
20. Kovalenko G.M., Bokova E.S. Impregnation of textile materials with flame retardants based on interpolymer complexes. *News of higher educational institutions. Textile industry technology*. 2015; 6(360):221-226. (rus).
21. Lau C., Mi Y. A study of blending and complexation of poly (acrylic acid)/poly (vinyl pyrrolidone). *Polymer*. 2002; 43:823-829.
22. Besshaposhnikova V.I., Hammatova V.V., Lebedeva T.S., Merzlikina T.V. Fire protection of synthetic fibers and fabrics. In the collection : Actual problems of expertise, technical regulation and conformity assessment of textile and light industry products. *Collection of works on the results of the Round Table with international participation*. 2021; 47-51. (rus).

Поступила 29.07.2023, после доработки 08.09.2023;

принята к публикации 26.09.2023

Received July 29, 2023; Received in revised form September 8, 2023;

Accepted September 26, 2023

Информация об авторах

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д-р техн. наук, профессор, главный 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; AuthorID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, 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; ResearcherID: AAB-9575-2019; AuthorID: 55847911600; PИИД ID: 774306; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

СЕРКОВ Борис Борисович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, 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; AuthorID: 434203; ORCID: 0009-0009-1570-3992; e-mail: serkovboris@icloud.com

Information about the authors

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; AuthorID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ResearcherID: AAB-9575-2019; AuthorID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

Boris B. SERKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department, 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; AuthorID: 434203; ORCID: 0009-0009-1570-3992; e-mail: serkovboris@icloud.com

ГОЛОВ Николай Витальевич, канд. техн. наук, старший 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; ORCID: 0000-0002-8817-3445; e-mail: nv_golov@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Nikolay V. GOLOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8817-3445; e-mail: nv_golov@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе

Андрей Анатольевич Галигузов^{1, 2✉}, Анхель Анхелевич Сердан (мл.)¹, Николай Владимирович Яшин¹, Виктор Васильевич Авдеев¹

¹ МГУ имени М.В.Ломоносова, Химический факультет, г. Москва, Россия

² АО УНИХИМТЕК, Московская область, г. Подольск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние несколько лет пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), наполненный интумесцентными материалами, используется как компонент пассивной огнезащиты. Важными характеристиками таких материалов являются физико-механические свойства, степень и температурный профиль вспенивания, воспламеняемость. Эти характеристики значительно зависят от свойств полимерной матрицы интумесцентного материала. В данной работе исследована взаимосвязь между составом ПВХ-пластиката и свойствами огнезащитных материалов на его основе.

Материалы и методы исследования. В работе были использованы интумесцентные огнезащитные материалы на основе ПВХ-пластиката различного состава: с изменением молекулярной массы ПВХ и содержания пластификатора в составе пластиката. Пластикат был получен методом интенсивного смешения порошка ПВХ с пластификатором и комплексным стабилизатором. Огнезащитный материал получали методом сухого смешения порошков пластиката, эластомерного компонента, антипирена и интумесцентного материала с последующим экструдированием смеси через плоскощелевую фильеру. Для полученных материалов был определен комплекс свойств: плотность, твердость, прочность и удлинение при растяжении, термостойкость, степень вспенивания в интервале 300–800 °С, воспламеняемость, морфология поверхности изломов, показатель текучести расплава.

Результаты и их обсуждение. В работе приведены результаты исследования физико-механических и термических свойств огнезащитных материалов, их огнезащитной эффективности. Было установлено, что прочность при растяжении при введении наполнителей в полимерный материал снижается на 20–62 %, что типично для наполнителей с низкой адгезией к полимеру. При этом увеличение твердости может достигать 32 %. Вязкость полимерной матрицы в основе огнезащитного материала определяет процесс его вспенивания.

Выводы. Для огнезащитных материалов на основе ПВХ-пластиката наблюдается:

- 1) снижение физико-механических свойств относительно полимерного материала;
- 2) наличие окисленного графита в составе огнезащитного материала определяет снижение термостойкости полимерной матрицы при получении огнезащитных материалов;
- 3) вязкость полимерной основы в составе огнезащитного материала может служить показателем, определяющим изменение термостойкости и степени вспенивания.

Ключевые слова: поливинилхлорид; пластификатор; окисленный графит; интумесцентный материал; огнезащитный материал; компаундирование; экструзия; степень вспенивания; вязкость

Благодарности. Статья выполнена на основании результатов работ по теме «Разработка технологических процессов производства новых огнезащитных материалов и изделий на их основе», гос. задание № 123030200019-5.

Для цитирования: Галигузов А.А., Сердан А.А. (мл.), Яшин Н.В., Авдеев В.В. Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 26–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39

✉ Галигузов Андрей Анатольевич, e-mail: agaliguzov@yandex.ru

Influence of PVC compound composition on the performance properties and flame retardant efficiency of polymer materials

Andrey A. Galiguzov^{1,2}✉, Angel A. Serdan (jr.)¹, Nikolay V. Yashin¹, Viktor V. Avdeev¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russian Federation

² JSC UNICHIMTEK, Moscow Region, Podolsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the last few years, plasticized PVC filled with intumescent materials was used as a passive fire protection component. Important characteristics of such materials are physical and mechanical properties, degree and temperature profile of foaming and flammability. These characteristics significantly depend on the properties of the polymer matrix of the intumescent material. In this paper, the relationship between the composition of PVC compound and the properties of flame-retardant materials based on it is investigated.

Materials and methods of research. Intumescent flame-retardant materials based on PVC compound of different compositions were used in this paper: with changes in the molecular weight of PVC and plasticizer content in the composition of the PVC compound. The PVC compound was obtained by intensive mixing of PVC powder with a plasticizer and a complex stabilizer. The flame retardant material was obtained by dry mixing powders of PVC compound, elastomeric component, flame retardant and intumescent material, followed by extrusion of the mixture through a flat slot die. A set of properties was determined for the obtained materials: density, hardness, tensile strength and elongation, heat resistance, degree of foaming in the range of 300–800 °C, flammability, fracture surface morphology, melt flow index.

Results and their discussion. The paper presents the results of the study of physical, mechanical and thermal properties of the flame retardant materials and their flame retardant effectiveness. It was found that tensile strength when introducing fillers into polymer material decreases by 20–62 %, which is typical for fillers with low adhesion to the polymer. At the same time, hardness increases up to 32 %. The viscosity of the polymer matrix at the base of the flame retardant material determines the process of its foaming.

Conclusions. For the flame retardant materials based on PVC compound, the following is observed:

- 1) reduction of physical and mechanical properties relative to the polymer material;
- 2) the presence of oxidized graphite in the composition of the flame retardant material determines the decrease in the thermal resistance of the polymer matrix when producing fire-retardant materials;
- 3) viscosity of polymer base in the composition of the flame retardant material is an indicator that determines the change in heat resistance and degree of foaming.

Keywords: polyvinylchloride; plasticizer; oxidized graphite; intumescent material; fire-retardant material; compounding; extrusion; foaming degree; viscosity

Acknowledgment. The article is based on the results of the work on the theme “Development of technological processes for the production of new flame retardant materials and products based on them”, government contract No. 123030200019-5.

For citation: Galiguzov A.A., Serdan A.A. (jr.), Yashin N.V., Avdeev V.V. Influence of PVC compound composition on the performance properties and flame retardant efficiency of polymer materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):26-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39 (rus).

✉ Andrey Anatolevich Galiguzov, e-mail: agaliguzov@yandex.ru

Введение

В последние несколько лет пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), наполненный интумесцентными материалами, находит применение как компонент пассивной огнезащиты [1, 2]. Это обусловлено главным образом двумя причинами:

1) ПВХ характеризуется высоким содержанием хлора (56,7–74,0 масс. %) [3] и высоким кислородным индексом (КИ) — до 49 % [4];

2) при воздействии пламени на поверхности материала образуется вспененный кокс с низкой теплопроводностью, который изолирует полимер от высоких температур, тем самым снижая скорость пиролиза и распространение пламени [2, 5].

Одним из примеров интумесцентных материалов является интеркалированный графит. В усло-

виях термического удара он увеличивается в объеме в 300–400 раз. В процессе разложения интеркалята развивается давление до 15 бар [6, 7]. В зависимости от природы интеркалята при термоллизе выделяются газы, являющиеся движущей силой терморасширения: SO₂, NO₂, NO, CO₂, CO, H₂O, CF₂, C₂F₄, пары кислот H₂SO₄, HNO₃, CH₃COOH, H₃PO₄ и другие [8–12].

В ряде работ отмечено [13–15], что кинетика процесса вспенивания и кратность вспенивания высоковязких полимерных композиций значительно зависят от вязкости расплава полимера. Так, при повышении вязкости расплавов ПВХ-композиций процесс роста пузырьков замедляется, а в некоторых случаях полностью подавляется, что становится особенно заметным при вспенивании наполненных ПВХ-композиций. Данное явление хорошо изу-

чено на примере ПВХ в сочетании с порофорами. В зависимости от порофора имеет место влияние продуктов разложения порофора на структурирование ПВХ-композиции. В свою очередь, пластификаторы, технологические добавки, лубриканты и наполнители также оказывают влияние на процесс разложения порофора.

ПВХ — это высокомолекулярный полимер. В зависимости от степени полимеризации он имеет среднюю молекулярную массу от 40 000 до 180 000 [16]. Известно, что вязкость ПВХ-композиций существенно зависит как от степени пластификации (содержания пластификатора), так и от молекулярной массы исходного ПВХ. С увеличением содержания пластификатора в ПВХ-композиции происходит ослабление межмолекулярного взаимодействия между цепями макромолекул, в результате чего вязкость полимера снижается. С другой стороны, с увеличением молекулярной массы суспензионного ПВХ вязкость пластифицированных композиций на его основе возрастает.

На сегодняшний день влияние состава пластифицированных ПВХ-композиций на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность интумесцентных материалов на их основе изучено недостаточно хорошо. Целью данной работы было исследование эксплуатационных характеристик и огнезащитной эффективности интумесцентных материалов на основе пластифицированных ПВХ-композиций в зависимости от их состава.

Материалы и методы исследования

Для исследования влияния состава ПВХ-пластика на свойства интумесцентных огнезащитных материалов (ОЗМ / FRM — fire retardant materials) был использован суспензионный ПВХ трех марок (табл. 1).

Для получения пластика был использован порошок ПВХ, фталатный пластификатор (диоктилфталат (ДОФ) высшего сорта по ГОСТ 8728–88¹) и комплексный стабилизатор на основе свинца. Пластикат получали в высокоскоростном смесителе LMX10-S-VS (LabTech) при конечной температуре смешения 105–110 °С с последующим охлаждением и кондиционированием при комнатной температуре в течение 24 ч. Содержание пластификатора варьировали в ряду 30, 70 и 110 м.ч. ДОФ на 100 м.ч. ПВХ для марки 271PC. Для марок 257RF и 263RB пластикаты содержали 70 м.ч. ДОФ на 100 м.ч. ПВХ. Согласно описанной процедуре, были получены следующие ПВХ-пластикаты (табл. 2).

¹ ГОСТ 8728–88. Пластификаторы. Технические условия (дата введ. 01.01.90).

Таблица 1. Свойства суспензионного ПВХ различных марок
Table 1. Properties of suspension PVC of different grades

Показатель Characteristic	Марка ПВХ PVC grade		
	257RF	263RB	271PC
Константа Фикентчера (Кф) K-value	57,0 ± 1,0	63,0 ± 1,0	71,0 ± 1,0
Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³	0,53–0,60	0,54–0,59	0,46–0,57
Массовая доля влаги и летучих веществ, % Moisture and volatiles content, %	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Массовая доля винилхлорида, мг/кг Vinyl chloride content, mg/kg	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0

Таблица 2. Перечень полученных ПВХ-пластикатов
Table 2. List of obtained PVC compounds

Марка ПВХ PVC grade	Обозначение пластика PVC compound code		
	Содержание ДОФ (весовая часть) на 100 весовых частей ПВХ / DOP content (weight part) per 100 weight parts of PVC		
	30	70	110
257RF	–	257–70	–
263RB	–	263–70	–
271PC	27–30	271–70	271–110

Для получения интумесцентных огнезащитных материалов (ОЗМ) был использован базовый состав на основе следующих компонентов:

- ПВХ-пластикат;
- бутадиен-нитрильный порошкообразный каучук марки ПБНК-3365 с содержанием связанного акрилонитрила (31–35) %, ТУ 38.30328–2008²;
- ультрадисперсный гидроксид алюминия (TS303) (D50 — 3–6 мкм, потеря массы при прокаливании — 33,0–34,5 %), ТУ 2322-001-23374430–2015³;
- каолин марки КР-1 по ГОСТ 19608–84⁴;
- стеариновая кислота (SA1860, производство Китай);

² ТУ 38.30328–2008. Каучуки бутадиеннитрильные порошкообразные ПБНК-28, ПБНК-33.

³ ТУ 20.13.25.117-001-23374430–2022. Тонкодисперсный гидроксид алюминия. TS 302, TS 303, TS 305, TS 315, NS 330, TS 350.

⁴ ГОСТ 19608–84. Каолин обогащенный для резинотехнических и пластмассовых изделий, искусственных кож и тканей. Технические условия.

- бисульфатный окисленный графит (EG-250, производство Китай) ($D = 2,20 \text{ г/см}^3$, степень расширения — $300 \text{ см}^3/\text{г}$, выход пенографита — 65%).

Был использован двустадийный процесс получения ОЗМ. На первой стадии указанные компоненты в виде порошков были смешаны в высокоскоростном смесителе LMX10-S-VS (LabTech) при комнатной температуре с получением премиксов. Далее премиксы ОЗМ были компаундированы и экструдированы на двушнековом экструдере LTE20-44 (LabTech) ($D = 20 \text{ мм}$, $L/D 44$) при температуре $150\text{--}165 \text{ }^\circ\text{C}$ с использованием Т-образной плоскощелевой фильеры до получения полотна шириной $48\text{--}52 \text{ мм}$ и толщиной $1,5\text{--}1,6 \text{ мм}$.

Также дополнительно, согласно описанной процедуре, были получены образцы полимерных материалов (ПМ) состава «пластикат ПВХ, каучук ПБНК-3365, стеариновая кислота» в том же соотношении, в котором они были смешаны в составе ОЗМ.

Плотность и твердость экструдированных лент определяли по ГОСТ 15139–69⁵ и ГОСТ 24621–2015⁶ соответственно. Для полимерных смесей был определен показатель текучести расплава (ПТР) по ГОСТ 11645–2021⁷ с использованием аналитического пластометра XNR-400 при температуре $190 \text{ }^\circ\text{C}$ и нагрузке $3,8 \text{ кг}$.

Для образцов полимерных материалов и ОЗМ были определены прочность и относительное удлинение при растяжении согласно ГОСТ 270–75⁸. Испытание было проведено при комнатной температуре на образцах типа II с использованием универсальной испытательной машины серии HxK-S/U, модификация H5K-S при скорости перемещения $(50 \pm 50) \text{ мм/мин}$.

Термические свойства антипиренов, ПМ и ОЗМ были определены с помощью термогравиметрического анализа в динамическом режиме в атмосфере воздуха ($60 \text{ см}^3/\text{мин}$) с использованием синхронного термоанализатора STA 449 (Netzsch) в температурном интервале $40\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ при скорости подъема температуры 20 К/мин . В результате были получены кривые потери массы (ТГ) и скорости потери массы (ДТГ). В качестве критерия термостойкости были использованы темпе-

ратура начала разложения (T_i) и температура максимальной скорости разложения ($T_{\max}$) [17–19].

Воспламеняемость материалов была определена согласно UL 94.

Степень вспенивания была определена в условиях термического удара при температуре в диапазоне от 300 до $600 \text{ }^\circ\text{C}$ (с шагом $100 \text{ }^\circ\text{C}$) и изотермической выдержкой 8 мин с последующим охлаждением до комнатной температуры. Данный показатель был рассчитан согласно уравнению:

$$FR = H/h \cdot 100 \%,$$

где FR — степень вспенивания, %;

H — высота вспененного образца, мм;

h — высота исходного образца, мм.

На основании результатов была получена динамика вспенивания как зависимость от температуры и свойств ПВХ-композиций.

Структура и морфология изломов образцов ОЗМ были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 LMU при ускоряющем напряжении 20 В .

Результаты и их обсуждение

В настоящее время интумесцентные ОЗМ на основе полимеров активно используются в качестве рулонных материалов для пассивной огнезащиты конструкций и сооружений различного назначения: лифтов, противопожарных дверей, вентиляционных клапанов, элементов трубопровода, канализационных труб и т.д. Из них изготавливают противопожарные муфты (манжеты) [20–24], огнезащитные ленты и профили [25–28], терморасширяющиеся втулки для защиты сварных швов стальных трубопроводов⁹ и т.д. Для таких материалов контролируют комплекс характеристик: физико-механические (твердость, прочность на разрыв), термические (термостойкость) и огнезащитные свойства (температура начала вспенивания, степень вспенивания, воспламеняемость, прочность/каркадность пенококса). Эти характеристики существенно зависят от полимерной основы, применяемой при получении рулонных ОЗМ.

Поливинилхлорид — это высокомолекулярный полимер, который имеет хорошую совместимость с широким рядом пластификаторов. В непластифицированном виде ПВХ является жестким. При введении пластификатора в результате ослабления межмолекулярного взаимодействия между цепями макромолекул ПВХ изменяется ряд технологических и эксплуатационных свойств полимерного

⁵ ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы).

⁶ Межгосударственный стандарт ГОСТ 24621–2015 (ISO 868:2003). Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору) (введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 ноября 2015 г. № 1936-ст).

⁷ ГОСТ 11645–2021. Пластмассы. Методы определения показателя текучести расплава термопластов.

⁸ ГОСТ 270–75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении.

⁹ Михайлов С.С. Устройство внутренней защиты сварного шва трубопровода. Патент № RU 139694, заявка № 2013145503/02, опубл. 20.04.2014.

материала: улучшается технологичность полимерной массы, увеличиваются эластичность и морозостойкость, снижается твердость конечного изделия [29]. В табл. 3 и 4 для полимерных материалов и ОЗМ, соответственно, представлены значения показателей, указанных в экспериментальной части.

Как видно из данных, представленных в таблицах, при увеличении содержания пластификатора

и увеличении молекулярной массы ПВХ наблюдается характеристичное изменение физико-механических свойств ПМ и ОЗМ. В первом случае происходит:

1) снижение прочности и увеличение относительного удлинения при растяжении (рис. 1). В этом случае прочность для ПМ и ОЗМ снижается не в равной степени: в 2,95 раза для ПМ и в 2,2 раза для ОЗМ. Это связано с явлением взаимодействия

Таблица 3. Свойства ПМ

Table 3. Properties of PM

Показатель Characteristic	Обозначение ПМ PM code				
	ПМ (257–70) PM (257–70)	ПМ (263–70) PM (263–70)	ПМ (271–30) PM (271–30)	ПМ (271–70) PM (271–70)	ПМ (271–110) PM (271–110)
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,170	1,178	1,244	1,172	1,133
Твердость по Шору А Shore A Hardness	52	55	76	56	42
Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	5,3	6,6	14,2	8,0	4,8
Относительное удлинение при растяжении, % Tensile elongation, %	255	312	340	403	495
ПТР, при 190 °С, 3,8 кг, г/10 мин MFI, at 190 °C, 3.8 kg, g/10 min	33,6	17,7	0,5	4,3	39,4
Температура начала разложения, °С Decomposition onset temperature, °C	272	275	276	273	272
Температура максимальной скорости разложения, °С Temperature of maximum decomposition rate, °C	291	296	296	296	294

Таблица 4. Свойства ОЗМ

Table 4. Properties of FRM

Показатель Characteristic	Обозначение ОЗМ FRM code				
	ОЗМ (257–70) FRM (257–70)	ОЗМ (263–70) FRM (263–70)	ОЗМ (271–30) FRM (271–30)	ОЗМ (271–70) FRM (271–70)	ОЗМ (271–110) FRM (271–110)
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,371	1,361	1,310	1,338	1,330
Твердость по Шору А Shore A Hardness	69	69	76	68	62
Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	4,1	4,9	8,8	5,8	4,0
Относительное удлинение при растяжении, % Tensile elongation, %	108,3	162,0	116	281,8	355,5
Температура начала разложения, °С Decomposition onset temperature, °C	223	226	247	230	220
Температура максимальной скорости разложения, °С Temperature of maximum decomposition rate, °C	244	249	275	255	244
Воспламеняемость Flammability	V–0	V–0	V–0	V–0	V–0

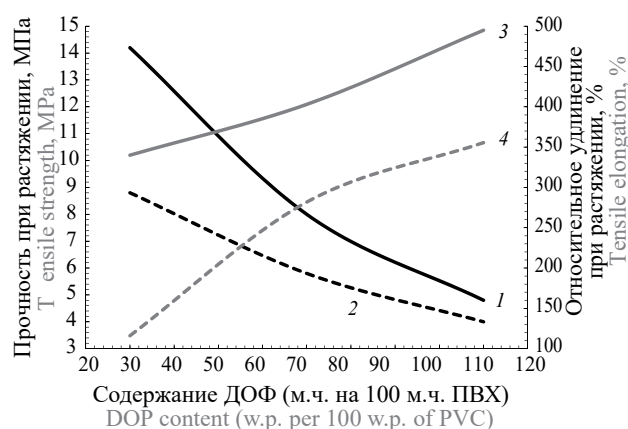
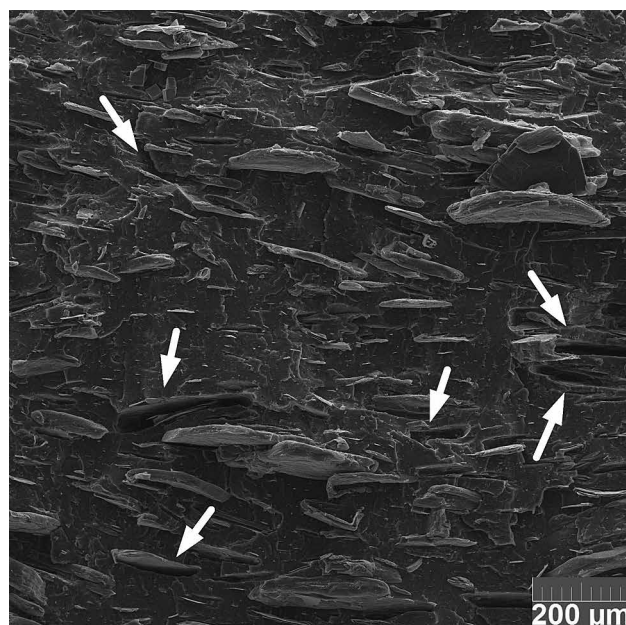


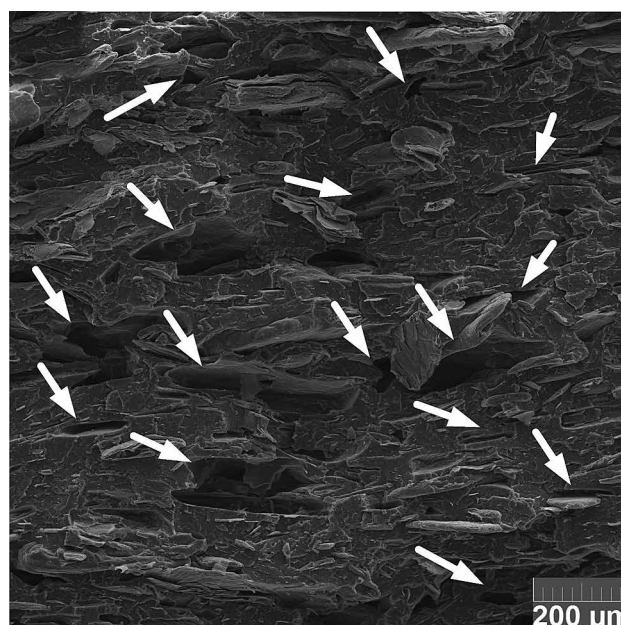
Рис. 1. Кривые зависимости прочности и относительного удлинения при растяжении от содержания ДОФ: 1 и 2 — прочности ПМ и ОЗМ; 3 и 4 — относительного удлинения ПМ и ОЗМ соответственно

Fig. 1. Dependence of tensile strength and elongation on the DOP content: 1 and 2 — strength of PM and FRM; 3 and 4 — elongation of PM and FRM respectively

между полимером и наполнителем при деформации ОЗМ: на границе фаз наполнителя и матрицы при растяжении наблюдается образование так называемых вакуолей, по которым происходит отслаивание матрицы от наполнителя. При увеличении содержания пластификатора доля образующихся вакуолей снижается [30]. Кроме того, при переработке более вязких полимеров, каким является ОЗМ (271–30), при введении наполнителей происходит образование большего количества дефектов как в самом полимере, так и на границе фаз «полимер–наполнитель» (рис. 2). Как видно из рис. 2, структура ОЗМ (271–30) более дефектная и пористая по сравнению с ОЗМ (271–110).



a



b

Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности изломов ОЗМ (271–110) (а) и ОЗМ (271–30) (б)

Fig. 2. SEM-images of fracture surface of FRM (271–110) (a) and FRM (271–30) (b)

Следствием последнего также являются практически равные значения плотности ОЗМ при изменении содержания ДОФ, тогда как в случае ПМ плотность снижается соответственно увеличению содержания пластификатора (рис. 3);

2) линейное снижение твердости ПМ по Шору А при увеличении содержания ДОФ является закономерным (см. рис. 3). Снижение этого показателя лежит в основе методики определения эффективности пластификатора [31]. При добавлении наполнителей (при получении ОЗМ) наблюдается увеличение твердости только для составов ОЗМ (271–70) и ОЗМ (271–110) относительно ПМ. Для составов ПМ (271–30) и ОЗМ (271–30) значения твердости равны и составляют 76 усл. ед. Данное явление связано с тем, что наполнители усиливают связь между макромолекулами полимера, затрудняя их скольжение относительно друг друга [30].

При увеличении значения Кф (увеличении молекулярной массы) ПВХ происходит рост длины макромолекул, в результате прочность при растяжении как для ПМ, так и для ОЗМ увеличивается. Характер изменений прочности для двух типов материалов схож и представляет собой линейную зависимость от значения Кф (рис. 4). Снижение прочности ОЗМ относительно ПМ составляет около 26–28 %. Это является типичным при введении в ПВХ наполнителей с низкой поверхностной активностью относительно полимера, каким является окисленный графит. В результате при введении наполнителя адгезионная связь на поверхности «наполнитель–полимер» становится менее прочной,

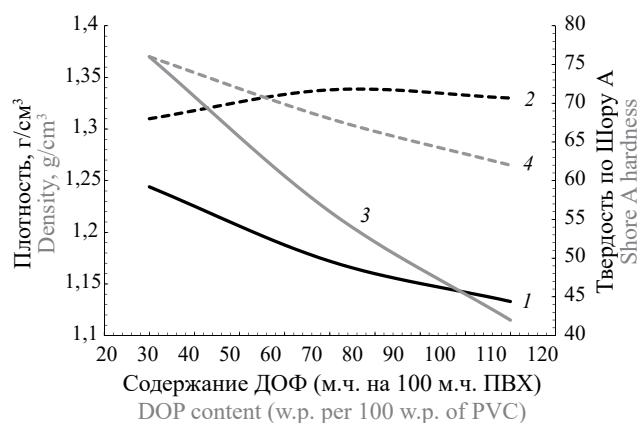


Рис. 3. Кривые зависимости плотности и твердости от содержания пластификатора: 1 и 2 — прочности ПМ и ОЗМ; 3 и 4 — твердости ПМ и ОЗМ соответственно

Fig. 3. Dependence of density and hardness on the DOP content: 1 and 2 — density of PM and FRM; 3 and 4 — hardness of PM and FRM respectively

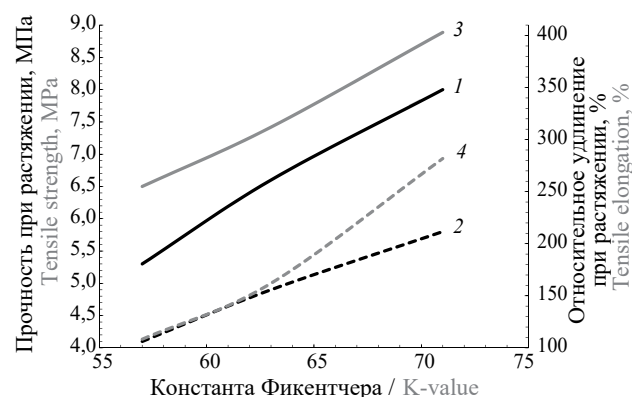


Рис. 4. Кривые зависимости прочности и относительного удлинения при растяжении от значения Кф: 1 и 2 — прочности ПМ и ОЗМ; 3 и 4 — относительного удлинения ПМ и ОЗМ соответственно

Fig. 4. Dependence of tensile strength and elongation on the K-value: 1 and 2 — strength of PM and FRM; 3 and 4 — elongation of PM and FRM, respectively

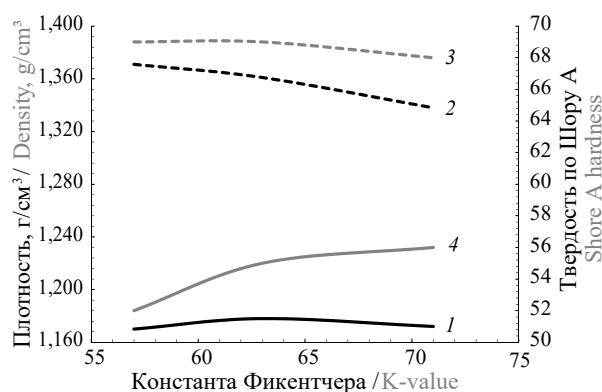
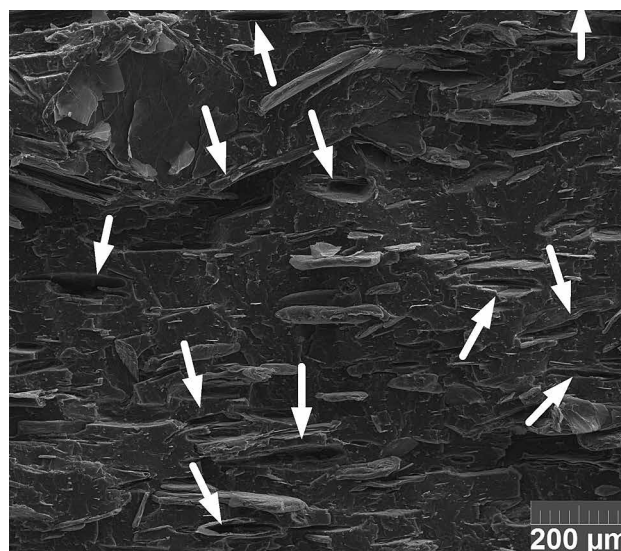
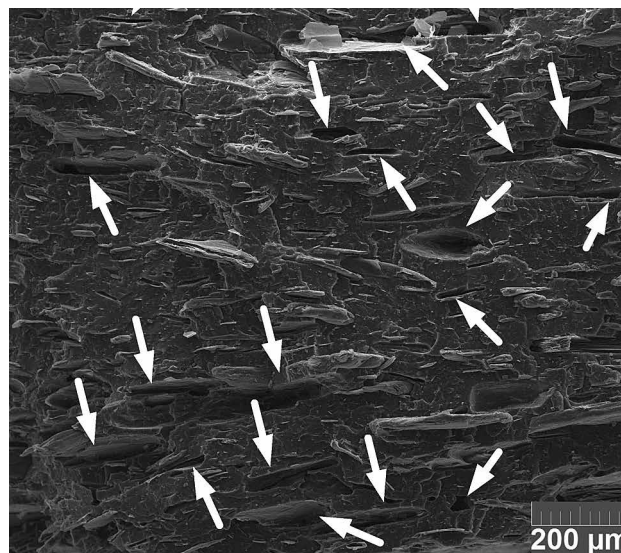


Рис. 5. Кривые зависимости плотности и твердости от значения Кф: 1 и 2 — прочности ПМ и ОЗМ; 3 и 4 — твердости ПМ и ОЗМ соответственно

Fig. 5. Dependence of density and hardness on the K-value: 1 and 2 — density of PM and FRM; 3 and 4 — hardness of PM and FRM respectively



a



b

Рис. 6. СЭМ-изображения поверхности изломов ОЗМ (257–70) (а) и ОЗМ (271–70) (б)

Fig. 6. SEM-images of fracture surface of FRM (257–70) (a) and FRM (271–70) (b)

чем между макромолекулами в ПМ, даже в случае пластифицированных компаундов [30, 32].

При изменении молекулярной массы ПВХ значение плотности ПМ практически не меняется (рис. 5), тогда как для ОЗМ происходит снижение плотности, в результате образования более пористой и дефектной структуры в случае состава с ПВХ с большей молекулярной массой (рис. 6), который имеет более высокую вязкость при переработке (см. табл. 3). Как видно на рис. 5, значение твердости ПМ при увеличении Кф от 57 до 71 увеличивается на 4 усл. ед., тогда как для ОЗМ данный показатель практически не изменяется.

Поливинилхлорид обладает превосходными свойствами огнестойкости, которые обусловлены высоким содержанием хлора в составе полимера,

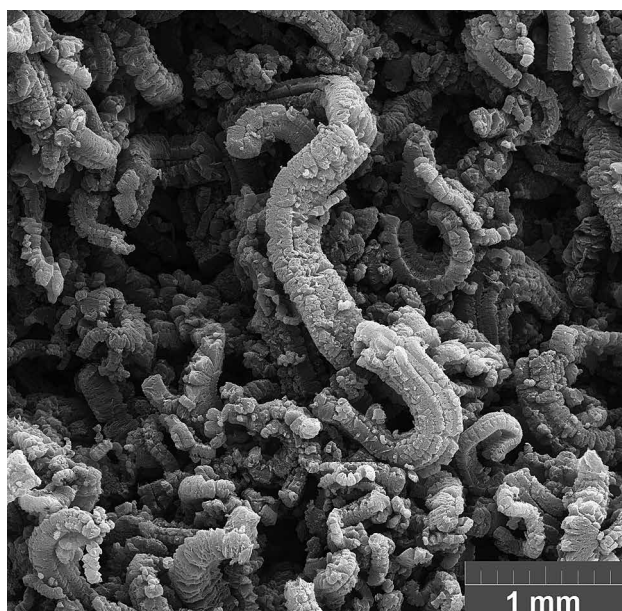


Рис. 7. СЭМ-изображение образца ОЗМ, вспененного в условиях термического удара при температуре 600 °C и изотермической выдержки в течение 8 мин

Fig. 7. SEM-image of FRM sample treated under thermal shock conditions at a temperature of 600 °C and isothermal exposure for 8 min

в результате чего ПВХ, как правило, не поддерживает горения после удаления источника тепла или пламени [33]. Добавление горючих пластификаторов приводит к снижению кислородного индекса и повышению воспламеняемости. Так, жесткий ПВХ имеет значение КИ 49,8 %, тогда как добавление горючего пластификатора ДОФ (КИ 16,4 [17]) в количестве 50 м.ч. ДОФ на 100 м.ч. снижает значение КИ пластика до 23,9 % [34]. При получении огнезащитных материалов на основе горючего ПВХ-пластиката используются антипирены. В данном случае в качестве антипиренов в работе были использованы ультрадисперсный гидроксид алюминия и бисульфатный окисленный графит. Последний также является интумесцентным материалом, который при вспенивании образует «червеобразные» фрагменты пенографита (рис. 7).

При разложении этих антипиренов выделяется значительное количество газов: H_2O (для $\text{Al}(\text{OH})_3$ [35]) и H_2O , SO_2 , CO_2 и CO (для окисленного графита [36]), которые разбавляют горючие продукты разложения ОЗМ. Согласно полученным результатам, воспламеняемость ОЗМ не зависит от содержания горючего пластификатора и молекулярной массы ПВХ в рассматриваемом диапазоне и имеет критерий по UL94, равный V-0.

Важной характеристикой ОЗМ является температура начала разложения (вспенивания) и термостойкость. На рис. 8 приведены кривые потери массы для полимерного материала ПМ (271–70), $\text{Al}(\text{OH})_3$, окисленного графита и ОЗМ (271–70).

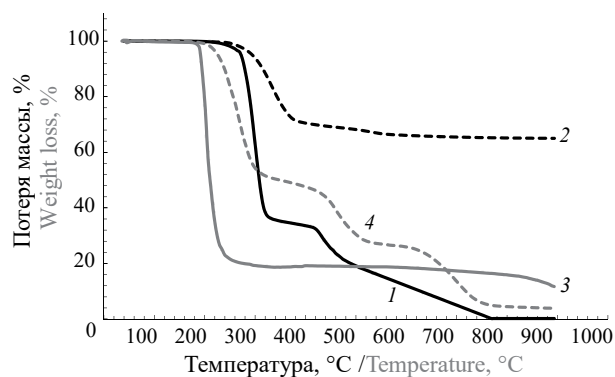


Рис. 8. Кривые потери массы материалов и антипиренов в окислительной атмосфере: 1 — ПМ (271–70); 2 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 3 — окисленный графит; 4 — ОЗМ (271–70)

Fig. 8. Mass loss curves of materials and fire retardants in an oxidizing atmosphere: 1 — PM (271–70); 2 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 3 — oxidized graphite; 4 — FRM (271–70)

В табл. 5 приведены показатели термостойкости (T_i и $T_{\max}$) этих материалов.

Согласно данным табл. 5, при добавлении антипиренов в полимерный материал (при получении ОЗМ) температура начала разложения (T_i) снижается с 273 до 230 °C (на 43 °C), в то время как значение $T_{\max}$ практически не изменяется. Первое связано, главным образом, с наличием окисленного графита в составе ОЗМ, который в свободном состоянии начинает разлагаться уже при температуре 189 °C. Схожая тенденция наблюдается и для других ОЗМ (см. табл. 3 и 4). Следует отметить, что существует взаимосвязь между

Таблица 5. Показатели термостойкости (T_i и $T_{\max}$) ПМ (271–70), окисленного графита, $\text{Al}(\text{OH})_3$ и ОЗМ (271–70)

Table 5. Thermal resistance data (T_i and $T_{\max}$) of PM (271–70), oxidized graphite, $\text{Al}(\text{OH})_3$ and FRM (271–70)

Показатель Characteristic	ПМ (271–70) PM (271–70)	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Окис- ленный графит Oxidized graphite	ОЗМ (271–70) FRM (271–70)
Темпера- тура начала разложения, T_i , °C Decompo- sition onset temperature, T_i , °C	273	290	189	230
Температура макси- мальной скорости разложения, $T_{\max}$, °C Temperature of maximum decompo- sition rate, $T_{\max}$, °C	296	332	206	301

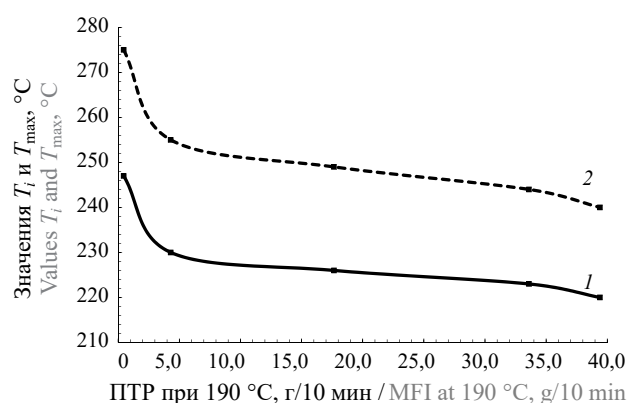


Рис. 9. Зависимость значений T_i (1) и $T_{\max}$ (2) для ОЗМ от ПТР соответствующего ПМ

Fig. 9. Dependence of T_i (1) and $T_{\max}$ (2) values for FRM on MFI of the corresponding PM

составом ПВХ-пластиката и показателями термостойкости, которая выражается в зависимости значений T_i и $T_{\max}$ для ОЗМ от вязкости соответствующего ПМ: в диапазоне ПТР от 4 до 40 г/10 мин она близка к линейной (рис. 9). Данное явление связано с кинетикой пенообразования на стадии разложения окисленного графита, которая определяется вязкостью полимерной матрицы. Ранее было установлено [37], что лимитирующей стадией процесса пенообразования является зародышеобразование в объеме жидкой фазы: зародыши газовых пузырьков образуются в объеме реагента при его переходе в вязкотекучее состояние с определенным значением вязкости. При вспенивании ОЗМ вязкость играет определяющую роль до момента начала образования перекрестных связей и циклических структур, которые приводят к формированию каркасного пенококса [38, 39]. На рис. 10 и 11 приведены зависимость степени расширения ОЗМ (FR) от значения ПТР соответствующего ПМ и динамика вспенивания различных ОЗМ в температурном интервале 300–800 °С. В заданном интервале температур наблюдается зависимость значения FR от ПТР, близкая к линейной. Для всех составов ОЗМ наблюдается падение степени расширения при температуре более 700 °С, что связано с окислением верхней части образца пенококса, которая, как правило, характеризуется наибольшей пористостью. Так, при увеличении продолжительности изотермической выдержки при 800 °С образца ОЗМ (271–110) с 8 до 16 мин высота образца уменьшается на 9,5 %. Кроме того, может иметь место уменьшение высоты образца при вспенивании в результате действия силы тяжести на участок ОЗМ, который находится в вязкотекучем состоянии. Известно, что структура пенококса интумесцентных материалов является неоднородной [40, 41]: верхняя часть образца является более пористой вследствие неоднородности нагрева (рис. 12). При испытании ОЗМ тепловой поток воздействует в первую очередь на «огневую»

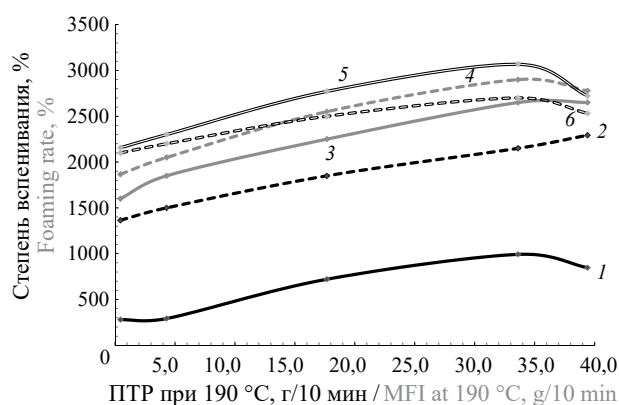


Рис. 10. Зависимость степени вспенивания ОЗМ от ПТР соответствующего ПМ при разных температурах: 1 — 300 °С; 2 — 400 °С; 3 — 500 °С; 4 — 600 °С; 5 — 700 °С; 6 — 800 °С

Fig. 10. Dependence of the foaming rate of the FRM on the MFI of the corresponding PM at different temperatures: 1 — 300 °С; 2 — 400 °С; 3 — 500 °С; 4 — 600 °С; 5 — 700 °С; 6 — 800 °С

сторону образца, которая наиболее быстро реагирует на тепловой поток. Далее вспененный слой действует как тепловой барьер, снижая скорость распространения тепла внутрь образца. Таким образом, при вспенивании ОЗМ в условиях термического удара максимальная скорость нагрева характерна только для верхней части образца. В структуре пенококса можно выделить три зоны: 1) рыхлая (наиболее пористая); 2) переходная и 3) плотная. Для всех типов ОЗМ наблюдается наличие всех трех зон. В случае ОЗМ (271–110) зона I имеет наибольшую высоту вследствие большего газовыделения, которое связано с высоким содержанием ДОФ. Согласно рис. 11, значение FR после 500 °С остается постоянным и при 800 °С незначительно снижается вследствие образования более пористой пены и ее окисления при изотермической выдержке.

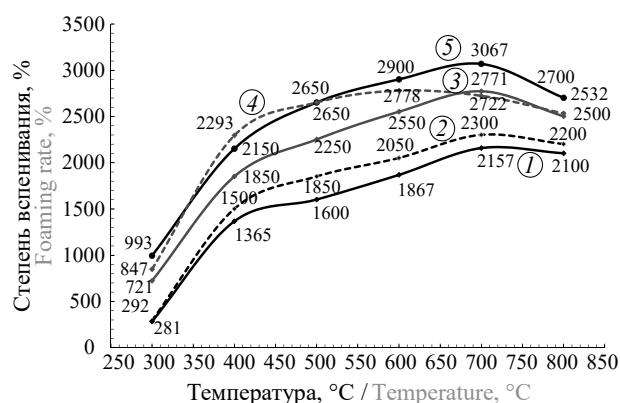


Рис. 11. Динамика вспенивания ОЗМ различного состава в температурном интервале 300–800 °С: 1 — ОЗМ (271–30); 2 — ОЗМ (271–70); 3 — ОЗМ (263–70); 4 — ОЗМ (271–110); 5 — ОЗМ (257–70)

Fig. 11. Foaming dynamics of different composition FRM in the temperature range 300–800 °С: 1 — FRM (271–30); 2 — FRM (271–70); 3 — FRM (263–70); 4 — FRM (271–110); 5 — FRM (257–70)

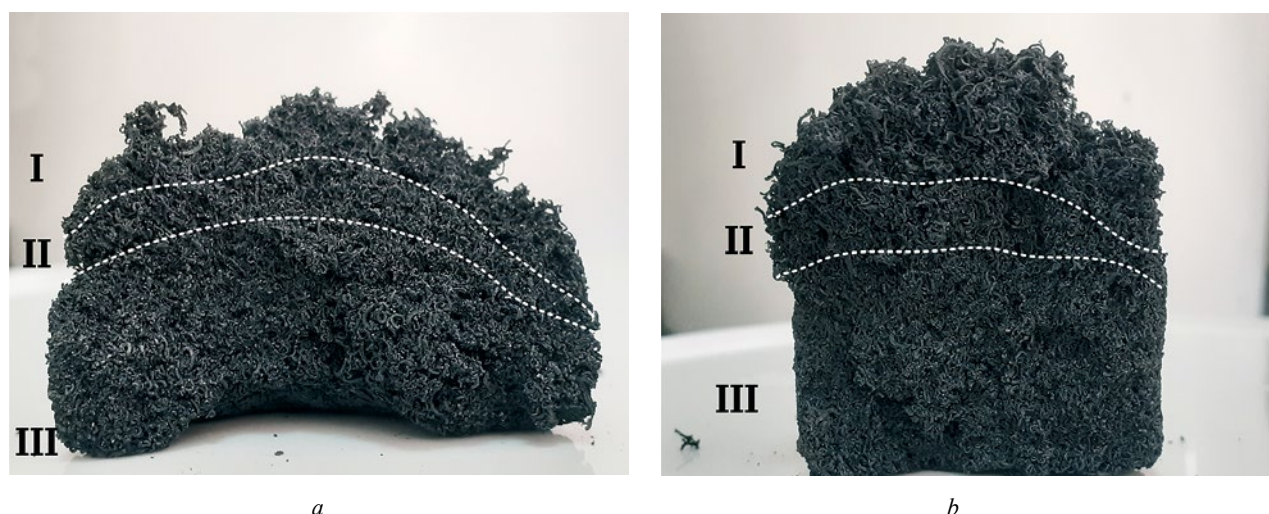


Рис. 12. Изображения поперечного сечения образцов пенококса, полученного в условиях термического удара при температуре 600 °C (8 мин) для ОЗМ (271–30) (a) и ОЗМ (271–110) (b): I — пористая зона; II — переходная зона; III — плотная зона
Fig. 12. Images of the cross section of foam char samples obtained under thermal shock conditions at a temperature of 600 °C (8 min) for FRM (271–30) (a) and FRM (271–110) (b): I — porous zone; II — transition zone; III — high density zone

Закключение и выводы

В результате проведенного исследования было установлено:

1) введение тригидрата алюминия и окисленного графита в полимерный материал на основе ПВХ приводит к ухудшению физико-механических свойств ОЗМ: в случае более вязких составов полимерного материала имеет место наличие более дефектной структуры в виде пор и отслоений как в самой матрице, так и на межфазной границе «полимер – наполнитель»;

2) термостойкость ОЗМ определяется, главным образом, наличием интумесцентного материала

(окисленного графита) в ОЗМ: при введении наполнителей в полимерный материал температура начала разложения снижается на 29–52 °C (в зависимости от состава пластика);

3) процесс вспенивания ОЗМ на основе ПВХ-пластиката определяется вязкостью полимерного материала в его основе: в диапазоне ПТР до 40 г/10 мин (при 190 °C, 3,8 кг) наблюдается, как правило, прямая зависимость степени вспенивания ОЗМ от значения ПТР (при температурах в диапазоне от 300 до 800 °C);

4) на основании полученных результатов становится возможным прогнозировать свойства ОЗМ в зависимости от состава ПВХ-пластиката, а также содержания и природы наполнителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Qu H., Wu W., Xie J., Xu J.* A novel intumescent flame retardant and smoke suppression system for flexible PVC // *Polymers for Advanced Technologies*. 2011. Vol. 22. Pp. 1174–1181. DOI: 10.1002/pat.1934
2. *Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu K.* Flexible PVC flame retarded with expandable graphite // *Polymer Degradation and Stability*. 2014. Vol. 100. Pp. 63–69. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.024
3. *Coaker A.W.* Fire and flame retardants for PVC // *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2003. Vol. 9. Vol. 3. Pp. 108–115. DOI: 10.1002/vnl.10072
4. *Lagreve C., Ferry L., Lopez-Cuesta J.-M.* Flame Retardant Polymer Materials Design for Wire and Cable Applications. In *Flame Retardant Polymeric Materials : a Handbook* / Edited by Y. Hu, X. Wang. Boca Raton : Taylor and Francis Group, 2020. 294 p. DOI: 10.1201/b22345-14
5. *Халтуринский Н.А., Новиков Д.Д., Жорина Л.А., Компаниец Л.В., Рудакова Т.А.* Влияние интумесцентных антипиренов на горючесть ПВХ пластикатов // *Химическая физика и мезоскопия*. 2009. Т. 11. № 1. С. 22–27. EDN: RJLTAR.
6. *Фиалков А.С.* Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М. : Аспект Пресс, 1997. С. 365.
7. *Кропачев Р.В., Новокионов В.В., Вольфсон С.И., Михайлова С.Н.* Терморасширяющиеся полимерные композиционные материалы // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 5. С. 60–63.
8. *Nobuatsu W., Satoshi K., Hiroki I.* Thermal Decomposition of Graphite Fluoride. I. Decomposition Products of Graphite Fluoride, (CF)_n in a Vacuum // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1980. Vol. 53. Vol. 10. Pp. 2731–2734. DOI: 10.1246/bcsj.53.2731

9. Садаминов М.И. Термолиз графита, интеркалированного азотной кислотой, в различных газовых средах : дис. ... канд. хим. наук. М., 2013. С. 10–48.
10. Сорокина Н.Е. Интеркалированные соединения графита с кислотами: синтез, свойства, применение : дис. ... д-ра хим. наук. М., 2007. С. 182–190.
11. Chung D.D.L. Exfoliation of graphite // *Journal of Materials Science*. 1987. Vol. 22. Pp. 4190–4198. DOI: 10.1007/BF01132008
12. Camino G., Duquesne S., Delobel R., Eling B., Lindsay C., Roels T. Mechanism of Expandable Graphite Fire Retardant Action in Polyurethanes // *ACS Symposium Series*. 2001. Vol. 797. Pp. 90–109. DOI: 10.1021/bk-2001-0797.ch008
13. Марков А.В., Тахсин А. Саки, Токарева Е.В. Влияние процесса разложения порофора азодикарбонамида на процесс вспенивания полимерных композиций // *Пластические массы*. 2020. № 9–10. С. 35–39. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-35-39
14. Марков А.В., Тахсин А. Саки. Влияние технологических добавок на вспенивание жестких поливинилхлоридных композиций азодикарбонамидом // *Тонкие химические технологии*. 2014. Т. 9. № 3. С. 79–85.
15. Марков А.В., Тахсин А. Саки, Угличева А.Ю. Особенности вспенивания жестких поливинилхлоридных композиций азодикарбонамидом // *Тонкие химические технологии*. 2013. Т. 8. № 6. С. 99–102.
16. Wypych G. *PVC // Degradation and Stabilization*. Toronto : ChemTec Publishing, 2020. Pp. 8, 258, 345–355. DOI: 10.1016/C2019-0-00335-4
17. Ушков В.А., Лалаян В.М., Невзоров Д.И., Ломакин С.М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2013. Т. 22. № 10. С. 25–33. eLIBRARY ID: 20405994.
18. Ушков В.А., Лалаян В.М., Ломакин С.М., Невзоров Д.И. Горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов с разлагающимися минеральными наполнителями // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2013. Т. 22. № 8. С. 15–24. eLIBRARY ID: 20349093.
19. Griffin G., Bicknell A.D., Brown T.J. Studies on the Effect of Atmospheric Oxygen Content on the Thermal Resistance of Intumescent, Fire-Retardant Coatings // *Journal of Fire Sciences*. 2005. Vol. 23. Issue 4. Pp. 303–328. DOI: 10.1177/0734904105048598
20. US Patent, No. US 6470635 B2. Coupling assembly with intumescent material / K.R. Cornwall. Publ. date 29.10.2002.
21. Canadian Patent, No. CA 2351262 A1. Composition for molded fire stop / F. Xing, M. Harle, B. Didone. Publ. date 22.12.2002
22. EU Patent, No. EP 2397514 A2. Firestop composition comprising thermoplastic, intumescent, and flame retardants / Zhvanetskiy I., Page J.B., Bernt K. Publ. date 21.12.2011.
23. US Patent, No. US 7676991 B2. Fire collar / J.W.G. Truss. Publ. date 16.03.2016.
24. US Patent, No. US 20200056073 A1. Intumescent Firestop Tape Construction / J.C. Hulteen, G.W. Frost, R.J. Haffner, E.L. Schmidt. Publ. date 20.02.2020.
25. EU Patent, No. EP 0745751 A2. Intumescent strip. P.L. Boot. Publ. date 08.09.1999.
26. US Patent, No. US 20030035912 A1. Intumescent fire-protection strips jacketed on three sides and combined cold-and hot-gas seals / H. Horacek. Publ. date 04.05.2004.
27. EU Patent, No. EP 0879870 B1. Intumescent sealing and cover sections / H.Dr. Horacek. publ. date 29.08.2001.
28. EU Patent, No. EP 0879870 B1. Intumescent sealing and cover sections / H.Dr. Horacek. publ. date 29.08.2001.
29. Wypych G. Introduction in : handbook of Plasticizers. 3rd Edition / Edited by Wypych G. Toronto : ChemTec Publishing, 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/B978-1-895198-97-3.50003-2
30. Гузев В.В. Структура и свойства наполненного ПВХ. СПб. : Научные основы и технологии, 2012. С. 95–130.
31. Краускопф Л.Г., Годвин А. Пластификаторы. Глава 5. ПВХ (Поливинилхлорид). Получение, добавки и наполнители, сополимеры, свойства, переработка / под ред. Д. Саммерс, Ч. Уилки, Ч. Даниэлс. СПб. : Профессия, 2007. С. 218–220.
32. Гуткович С.А. Особенности получения и применения поливинилхлорида с различными физико-химическими характеристиками : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. С. 181–203.
33. Bocchini S., Camino G. Halogen-containing flame retardants. Chapter 4 in: *Fire Retardancy of Polymeric Materials* / Ed. by C.A. Wilkie, A.B. Morgan. 2nd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2010. Pp. 75–105. DOI: 10.1201/9781420084009-c4
34. Carty P., White S. The effect of DOP plasticizer on smoke formation in poly(vinyl chloride) // *Polymer*. 1992. Vol. 33. Issue 5. Pp. 1110–1111. DOI: 10.1016/0032-3861(92)90033-S
35. Murphy J. *Additives for Plastics Handbook*. Second Edition. Oxford : Elsevier, 2001. Pp. 115–140. DOI: 10.1016/B978-1-85617-370-4.X5000-3

36. Muir K., Liggett J.J., O'Keeffe L. Thermal volatilisation analysis of graphite intercalation compound fire retardants // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. Pp. 1905–1920. DOI: 10.1007/s10973-022-11804-8
37. Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 5. С. 71–81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81
38. Camino G., Lomakin S. Intumescent materials. Chapter 10 in: *Fire Retardant Materials* / Edited by A.R. Horrocks, D. Price. Cambridge : Woodhead Publishing, 2001. Pp. 318–336. DOI: 10.1533/9781855737464.318
39. Лавров Н.А., Колерт К., Ксенофонтов В.Г., Лаврова Т.В., Белухичев Е.В. О механизме деструкции поливинилхлорида // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2012. № 16 (42). С. 031–035. eLIBRARY ID: 18322320.
40. Luangtriratana P., Kandola B.K., Duquesne S., Bourbigot S. Quantification of Thermal Barrier Efficiency of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites // *Coatings*. 2018. Vol. 8. Issue 347. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/coatings8100347
41. Okuy G., Naik A.D., Samyn F., Jimenez M., Bourbigot S. Fractal conceptualization of intumescent fire barriers, toward simulations of virtual morphologies // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9(1872). Pp. 1–16. DOI: 10.1038/s41598-019-38515-9

REFERENCES

1. Qu H., Wu W., Xie J., Xu J. A novel intumescent flame retardant and smoke suppression system for flexible PVC. *Polymers for Advanced Technologies*. 2011; 22:1174-1181. DOI: 10.1002/pat.1934
2. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu K. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite. *Polymer Degradation and Stability*. 2014; 100:63-69. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.024
3. Coaker A.W. Fire and flame retardants for PVC. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2003; 9(3):108-115. DOI: 10.1002/vnl.10072
4. Lagreve C., Ferry L., Lopez-Cuesta J.-M. *Flame Retardant Polymer Materials Design for Wire and Cable Applications*. In *Flame Retardant Polymeric Materials : a Handbook*. Edited by Y. Hu, X. Wang. Boca Raton, Taylor and Francis Group. 2020; 294. DOI: 10.1201/b22345-14
5. Khalturinskiy N.A., Novikov D.D., Zhorina L.A., Kompanietz L.V., Rudakova T.A. The Effect of the Intumescent F.R. on the Flammability of PVC Plasticates. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2009; 11(1):22-27. (rus).
6. Fialkov A.S. *Carbon, interlayer compounds and composites based on it*. Moscow, Aspect Press. 1997; 365 (rus).
7. Kropachev R.V., Novokshonov V.V., Wolfson S.I., Mikhailova S.N. Thermal-expandable polymer composite materials. *Herald of technological university*. 2015; 18(5):60-63 (rus).
8. Nobuatsu W., Satoshi K., Hiroki I. Thermal Decomposition of Graphite Fluoride. I. Decomposition Products of Graphite Fluoride, (CF)_n in a Vacuum. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1980; 53(10):2731-2734. DOI: 10.1246/bcsj.53.2731
9. Saidaminov M.I. *Thermolysis of graphite intercalated with nitric acid in various gas environments : PhD thesis in chemistry*. Moscow, 2013; 10-48 (rus).
10. Sorokina N.E. *Intercalated graphite compounds with acids: synthesis, properties, application : Doctor thesis in chemistry*. Moscow, 2007; 182-190 (rus).
11. Chung D.D.L. Exfoliation of graphite. *Journal of Materials Science*. 1987; 22:4190-4198. DOI: 10.1007/BF01132008
12. Camino G., Duquesne S., Delobel R., Eling B., Lindsay C., Roels T. Mechanism of Expandable Graphite Fire Retardant Action in Polyurethanes. *ACS Symposium Series*. 2001; 797:90-109. DOI: 10.1021/bk-2001-0797.ch008
13. Markov A.V., Tahseen A. Saki, Tokareva E.V. The effect of the decomposition of porophore azodicarbonamide on the foaming process of polymer compositions. *Plasticheskie massy*. 2020; 9-10:35-39. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-35-39 (rus).
14. Markov A.V., Tahseen A. Saki. The Influence of Technological Additives on the Foaming Process of Rigid Polyvinylchloride Compositions with Azodicarbonamide. *Fine Chemical Technologies*. 2014; 9(3):79-85 (rus).
15. Markov A.V., Tahseen A. Saki, Uglicheva A.Yu. Features of foaming rigid polyvinyl chloride compositions with azodicarbonamide. *Fine Chemical Technologies*. 2013; 8(6):99-102 (rus).
16. Wypych G. *PVC. Degradation and Stabilization*. Toronto, ChemTec Publishing, 2020; 8, 258, 345-355. DOI: 10.1016/C2019-0-00335-4
17. Ushkov V.A., Lalayan V.M., Nevzorov D.I., Lomakin S.M. The Effect of Phthalate and Phosphorus Plasticizer for Flammability and Smoke-Forming Ability of Polymer Composite Materials. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(10):25-33. eLIBRARY ID: 20405994 (rus).

18. Ushkov V.A., Lalayan V.M., Lomakin S.M., Nevzorov D.I. Flammability and smoke generation ability of polymer composite materials with degradable mineral fillers. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(8):15-24. eLIBRARY ID: 20349093 (rus).
19. Griffin G., Bicknell A.D., Brown T.J. Studies on the Effect of Atmospheric Oxygen Content on the Thermal Resistance of Intumescent, Fire-Retardant Coatings. *Journal of Fire Sciences*. 2005; 23(4):303-328. DOI: 10.1177/0734904105048598
20. Cornwall K.R. *Coupling assembly with intumescent material*. US Patent, No. US 6470635 B2, publ. date 29.10.2002.
21. Xing F., Harle M., Didone B. *Composition for molded fire stop*. Canadian Patent, No. CA 2351262 A1, publ. date 22.12.2002.
22. Zhvanetskiy I., Page J.B., Bernt K. *Firestop composition comprising thermoplastic, intumescent, and flame retardants*. EU Patent, No. EP 2397514 A2, publ. date 21.12.2011.
23. Truss J.W.G. *Fire collar*. US Patent, No. US 7676991 B2, publ. date 16.03.2016.
24. Hulteen J.C., Frost G.W., Haffner R.J., Schmidt E.L. *Intumescent Firestop Tape Construction*. US Patent, No. US 20200056073 A1, publ. date 20.02.2020.
25. Boot P.L. *Intumescent strip*. EU Patent, No. EP 0745751 A2, publ. date 08.09.1999.
26. Horacek H. *Intumescent fire-protection strips jacketed on three sides and combined cold-and hot-gas seals*. US Patent, No. US 20030035912 A1, publ. date 04.05.2004.
27. Stalker I.G. *Seal for mounting to door frame*. EU Patent, No. EP 2378048 A1, publ. date 19.10.2011.
28. Horacek H.Dr. *Intumescent sealing and cover sections*. EU Patent, No. EP 0879870 B1, publ. date 29.08.2001.
29. Wypych G. *Introduction in : handbook of Plasticizers*. 3rd Edition. Edited by G. Wypych. Toronto, ChemTec Publishing. 2017; 1-6. DOI: 10.1016/B978-1-895198-97-3.50003-2
30. Guzeev V.V. *Structure and properties of filled PVC*. Saint Petersburg, Scientific foundations and technologies, 2012; 95-130 (rus).
31. Krauskopf L.G., Godvin A. Plasticizers Chapter 5. *PVC (Polyvinyl chloride). Preparation, additives and fillers, copolymers, properties, processing*. Edited by J. Summers, C. Wilkie, C. Daniels. Saint Petersburg, Profession, 2007; 218-220 (rus).
32. Gutkovich S.A. *Features of the production and use of polyvinyl chloride with various physical and chemical characteristics : Doctor thesis of Technical Sciences*. Moscow, 2011; 181-203 (rus).
33. Bocchini S., Camino G. *Halogen-containing flame retardants*. Chapter 4 in: *Fire Retardancy of Polymeric Materials*. Edited by C.A. Wilkie, A.B. Morgan 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2010; 75-105. DOI: 10.1201/9781420084009-c4
34. Carty P., White S. The effect of DOP plasticizer on smoke formation in poly(vinyl chloride). *Polymer*. 1992; 33(5):1110-1111. DOI: 10.1016/0032-3861(92)90033-S
35. Murphy J. *Additives for Plastics Handbook*. Second Edition. Oxford, Elsevier, 2001; 115-140. DOI: 10.1016/B978-1-85617-370-4.X5000-3
36. Muir K., Liggat J.J., O'Keeffe L. Thermal volatilisation analysis of graphite intercalation compound fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023; 148:1905-1920. DOI: 10.1007/s10973-022-11804-8
37. Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovskii Y.K., Shornikova O.N. The kinetics of intumescent flame retardant foaming. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):71-81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81 (rus).
38. Camino G., Lomakin S. *Intumescent materials*. Chapter 10 in: *Fire Retardant Materials*. Edited by A.R. Horrocks, D. Price. Cambridge, Woodhead Publishing, 2001; 318-336. DOI: 10.1533/9781855737464.318
39. Lavrov N.A., Collart K., Ksenofontov V.G., Lavrova T.V., Belukhichev E.V. About the mechanism of destruction of polyvinyl chloride. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology*. 2012; 16(42):031-035. eLIBRARY ID: 18322320 (rus).
40. Luangtriratanana P., Kandola B.K., Duquesne S., Bourbigot S. Quantification of Thermal Barrier Efficiency of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Coatings*. 2018; 8(347):1-18. DOI: 10.3390/coatings8100347
41. Okyay G., Naik A.D., Samyn F., Jimenez M., Bourbigot S. Fractal conceptualization of intumescent fire barriers, toward simulations of virtual morphologies. *Scientific Reports*. 2019; 9(1872):1-16. DOI: 10.1038/s41598-019-38515-9

Поступила 27.09.2023, после доработки 04.10.2023;

принята к публикации 09.10.2023

Received September 27, 2023; Received in revised form October 4, 2023;

Accepted October 9, 2023

Информация об авторах

ГАЛИГУЗОВ Андрей Анатольевич, младший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, химический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; научный сотрудник, АО УНИХИМТЕК, Россия, 142181, Московская область, г. Подольск, мкр. Климовск, ул. Заводская, 2; ORCID: 0000-0002-5675-3891; e-mail: agaliguzov@yandex.ru

СЕРДАН Анхель Анхелевич (мл.), канд. хим. наук, научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, химический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; ORCID: 0009-0000-7607-3298; e-mail: cerdantu@gmail.com

ЯШИН Николай Владимирович, д-р хим. наук, старший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, химический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin.ni.v@gmail.com

АВДЕЕВ Виктор Васильевич, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии и новых материалов, химический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; ORCID: 0000-0001-5573-2987; e-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru

Вклад авторов:

Галигузов А.А. — концепция исследования; проведение экспериментов; анализ результатов; подготовка графической части; работа с редакцией.

Сердан А.А. (мл.) — консультация по написанию отдельных разделов.

Яшин Н.В. — написание введения, заключения; доработка текста.

Авдеев В.В. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Andrey A. GALIGUZOV, Low Researcher, Division of Chemical Technology and New Materials, Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Leninskie Gory, 1/11, Moscow, 119234, Russian Federation; Researcher, JSC UNICHIMTEK, Zavodskaya St., 2, mkr. Klimovsk, Podolsk, Moscow Region, 142181, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5675-3891; e-mail: agaliguzov@yandex.ru

Angel A. SERDAN (jr.), Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Division of Chemical Technology and New Materials, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1/11, Moscow, 119234, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-7607-3298; e-mail: cerdantu@gmail.com

Nikolay V. YASHIN, Dr. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Division of Chemical Technology and New Materials, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1/11, Moscow, 119234, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin.ni.v@gmail.com

Viktor V. AVDEEV, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Division of Chemical Technology and New Materials, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1/11, Moscow, 119234, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5573-2987; e-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru

Contribution of the authors:

Andrey A. Galiguzov — the concept of the study; conducting the experiments; analysis of the results; preparation of the graphic part; work with the editors.

Angel A. Serdan (jr.) — consultation on writing individual sections.

Nikolay V. Yashin — writing the introduction, conclusion; revision of the text.

Viktor V. Avdeev — scientific guidance.

The authors declare no conflicts of interests.

Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети

Андрей Александрович Евсиков, Илья Вадимович Самарин ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается решение задачи обнаружения очагов возгорания на технологических объектах в автоматическом режиме. Для этого выбран подход по созданию сверточной нейронной сети, способной работать на видеопотоке в реальном времени.

Цели и задачи. Целью данной работы является создание нейронной сети, способной обнаруживать пламя и дым на изображении с камер видеонаблюдения. Задачи исследования: выбор оптимальной архитектуры нейронной сети в соответствии с последними исследованиями в этой области; ускорение работы выбранной архитектуры с помощью методов квантования и прореживания фильтров

Методы. Рассматриваются различные архитектуры сверточных нейронных сетей, выполняющих задачу обнаружения объектов на изображении. Сравниваются их быстродействие и качество работы. Изучается архитектура YOLOv5, ее целевая функция, методы обучения и способы ускорения работы.

Результаты и их обсуждение. Показаны результаты обучения сверточной нейронной сети архитектуры YOLOv5 для задачи обнаружения пламени и дыма, а изменение результатов при применении методов ускорения нейронной сети. Определено, что использование таких методов ускорения, как квантование и фильтрация фильтров, позволяет значительно увеличить скорость работы нейронной сети, почти не потеряв в точности работы.

Выводы. Определена архитектура нейронной сети для обнаружения очага возгорания. На основе выбранной архитектуры обучена нейронная сеть, способная обнаруживать пламя и дым на изображении. Скорость ее работы дает возможность обрабатывать видеопоток в реальном времени без использования графического ускорителя.

Ключевые слова: компьютерное зрение; обнаружение пожаров; машинное обучение; обнаружение объектов в реальном времени; методы квантования и прореживания фильтров

Для цитирования: Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 40–48. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.40-48

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

Detection of fires at technological facilities using convolutional neural network

Andrey A. Evsikov, Ilya V. Samarin ✉

National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the solution of the problem of detecting fires at technological facilities in automatic mode. To solve this problem, an approach was chosen to create a convolutional neural network capable of operating on a real-time video stream.

Aims and Purposes. The aim of this work is to create a neural network capable of detecting flames and smoke in the image from CCTV cameras. The purposes of the work include: selection of the optimal architecture of the neural network in accordance with the latest research in this field; speeding up the chosen architecture using quantization and filter thinning techniques.

Methods. Different architectures of convolutional neural networks performing the task of detecting objects in an image are considered. Their performance and quality of work are compared. The YOLOv5 architecture, its target function, training methods and ways of speeding up work are considered.

Results and discussion. The paper shows the results of training a convolutional neural network of the YOLOv5 architecture for the task of flame and smoke detection, as well as how the results change when applying neural

network acceleration methods. It was determined that the use of such acceleration methods such as quantization and filter cleaning can significantly increase up the speed of the neural network, while almost no loss in accuracy of operation.

Conclusions. As a result of the conducted work, the architecture of the neural network was determined for performing the task of detecting a fire source. Based on the chosen architecture, a neural network was trained to detect flames and smoke in the image. The speed of its work allows to process video stream in real-time without using graphic accelerator.

Keywords: computer vision; fire detection; machine learning; real-time object detection; quantization and filter thinning methods

For citation: 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).

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

Введение

Своевременное обнаружение и локализация очага возгорания является одной из важнейших задач в рамках обеспечения комплексной безопасности технологического объекта. Если в небольших закрытых помещениях данная задача решается дымовыми и тепловыми пожарными извещателями, то для обнаружения возгорания на объемных установках, расположенных вне помещений, требуется применение иных технических средств.

Наибольшее распространение получили системы обнаружения огня, основанные на тепловых инфракрасных (ИК) камерах [1, 2] и стандартных камерах видеонаблюдения общего назначения.

Существует несколько основных подходов для обнаружения возгорания по изображению с камер. В работах [3–5] для выявления пламени используется анализ цветового спектра изображения. Другим наиболее популярным подходом служит использование сверточных нейронных сетей (СНС), выполняющих детекцию (обнаружение) объектов на изображении. Архитектуры СНС для данных целей активно развиваются в последние годы, что делает это направление наиболее интересным для исследований.

Цель настоящей работы — создание нейронной сети, способной обнаруживать пламя и дым на изображении с камер видеонаблюдения. В задачи входят:

- выбор оптимальной архитектуры нейронной сети в соответствии с последними исследованиями в этой области;
- ускорение работы выбранной архитектуры с помощью таких методов облегчения нейронной сети, как quantization (квантование) и filter pruning (прореживание фильтров).

Материалы и методы

В последние годы разработано множество архитектур нейронных сетей для обнаружения объектов на изображении. Существует два основных типа, на которые можно разделить такие архитектуры.

Первый тип — двухэтапные (two-stage) детекторы. К этому типу относятся такие архитектуры, как R-CNN [6], Mask R-CNN [7], Pyramid Networks [8]. Принцип работы данных архитектур заключается в определении области, где потенциально находится нужный объект, после чего на втором этапе по этой области производится классификация и уточнение границ объекта. В двухэтапных архитектурах в последнее время экспериментируют с использованием трансформеров, например Swin [9], в качестве backbone на первом этапе вместо сверточных архитектур.

Второй тип — одноэтапные архитектуры. Сюда входят YOLO [10], SSD [11], RetinaNet [12]. В них реализован принцип использования единой сверточной сети и определение положения и класса объекта происходит в один этап.

Как мера качества работы нейронных сетей для обнаружения объектов чаще всего применяется численная метрика mAP (mean average precision) на наборе данных COCO (Common Objects in Context) [13]. Эта метрика, несмотря на поиски более репрезентативных альтернатив [14], остается основной в рассматриваемой области. Иногда метрику могут использовать в качестве функции потерь для обучения нейронных сетей [15].

Метрика mAP представляет собой среднее по классам значение метрики AP (Average Precision — средняя точность). Рассчитывается по формуле:

$$mAP = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k AP_k, \quad (1)$$

где k — количество определяемых нейронной сетью классов.

Метрика AP — это площадь под Precision-Recall кривой. Данная кривая (рис. 1) строится по точкам в координатах точности (Precision) и полноты (Recall), где каждая точка соответствует значению этих метрик для каждого граничного значения степени уверенности (Confidence) от 0 до 1.

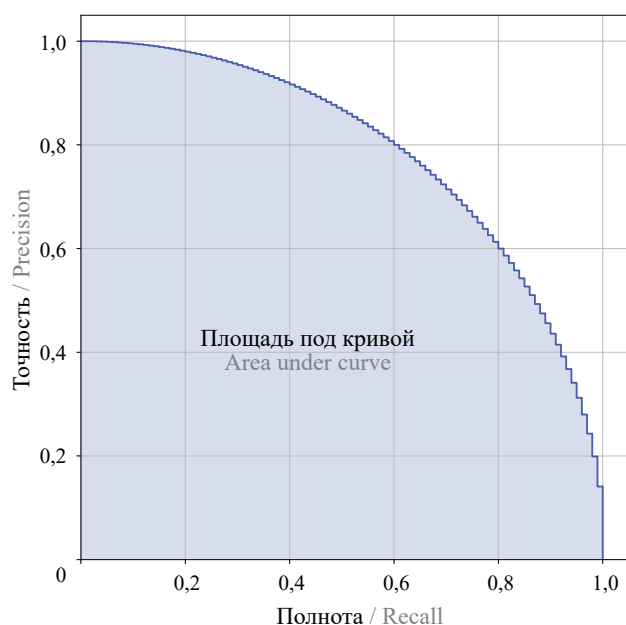


Рис. 1. Площадь под кривой точности – полноты
Fig. 1. Area under Precision – Recall curve

При расчете precision и recall за обнаруженный считается тот объект, у которого показатель IoU (Intersection over Union) и Confidence выше граничных.

IoU (Intersection over Union) рассчитывается как отношение площади пересечения размеченной вручную области с объектом на изображении с областью, найденной нейронной сетью, и общей площади, занимаемой этими двумя областями:

$$IoU = \frac{area_{true} \cap area_{pred}}{area_{true} \cup area_{pred}}. \quad (2)$$

У mAP существует несколько разновидностей, которые отличаются выбранным граничным значением IoU . Наиболее часто можно встретить два вида, где за граничное значение взяты 0,5 и 0,95. Такие метрики обозначаются как $mAP_{0,5}$ и $mAP_{0,95}$ соответственно. Для оценки качества работы нейронной сети на наборе данных COCO рассчитываются значения mAP для IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05, после чего по этим значениям берется среднее.

Еще одна важная характеристика нейронной сети — скорость обработки изображения. Есть несколько абсолютных метрик, характеризующих скорость работы. Первая — количество вычислительных операций с плавающей точкой (Floating Point Operations, FLOPs) для обработки одного изображения. Другой косвенной метрикой производительности служит количество параметров (весов) нейронной сети. Однако оба эти параметра не являются прямой характеристикой скорости обработки, так как конечная скорость зависит от множества нюансов, в первую очередь таких, как формат

модели нейронной сети, архитектура вычислителя и архитектура нейронной сети. Поэтому для оценки непосредственно скорости работы используют метрику количества изображений (кадров) в секунду (Frames Per Second, FPS), которое модель может обработать на определенном вычислителе, или обратную ей величину — время обработки одного изображения.

Недостаток этой метрики заключается в ее относительности и зависимости от конкретного вычислителя. С другой стороны, она позволяет точно определить, насколько именно отличаются разные модели по скорости работы.

В настоящей работе выбор архитектуры основывается на показателях качества обработки, скорости вычисления и удобства модификации архитектуры для более тонкой настройки под конкретную задачу.

Сегодня наивысшими показателями mAP на наборе данных COCO обладают архитектуры YOLOR-D6 [16] с показателем 0,573 и YOLOv6-L6 [17] с показателем 0,572. Однако у них высокая точность достигается за счет больших моделей, что приводит к низкой скорости обработки порядка 46 FPS на вычислителе Nvidia Tesla V100. В то же время YOLOv4 [18] с mAP 0,554 имеет показатель 161 FPS на том же вычислителе. При этом в репозитории, реализующем немного усовершенствованную архитектуру во фреймворке PyTorch на языке Python, где модель названа YOLOv5, есть наиболее гибкие возможности для изменения архитектуры под конкретную задачу. Поэтому в данной работе используется именно эта архитектура.

По своей структуре архитектура YOLOv5 устроена следующим образом (рис. 2).

YOLOv5, как и большинство архитектур семейства YOLO, состоит из трех основных блоков: позвоночник (Backbone), шея (Neck) и голова (Head).

Backbone включает CHC Darknet53, впервые использованную в YOLOv3 [19] с применением метода Cross Stage Partial (CSP). Данный блок извлекает карты признаков (feature maps) из исходного изображения.

Neck состоит из блока пространственной объединения пирамиды (Spatial Pyramid Pooling — SPP) и сети агрегации путей Path Aggregation Network (PANet). Эта часть выполняет агрегацию признаков из Backbone для выявления наиболее важных из них.

Head — блок, реализующий определение объектов (их позицию, размер, класс и Confidence). Принцип работы блока заключается в разделении изображения на квадратную сетку, для каждой ячейки которой на базе признаков из предыдущих слоев устанавливается наличие объектов каждого класса. Особенностью семейства архитектуры YOLO служит использование якорей (anchor). Якорь — это

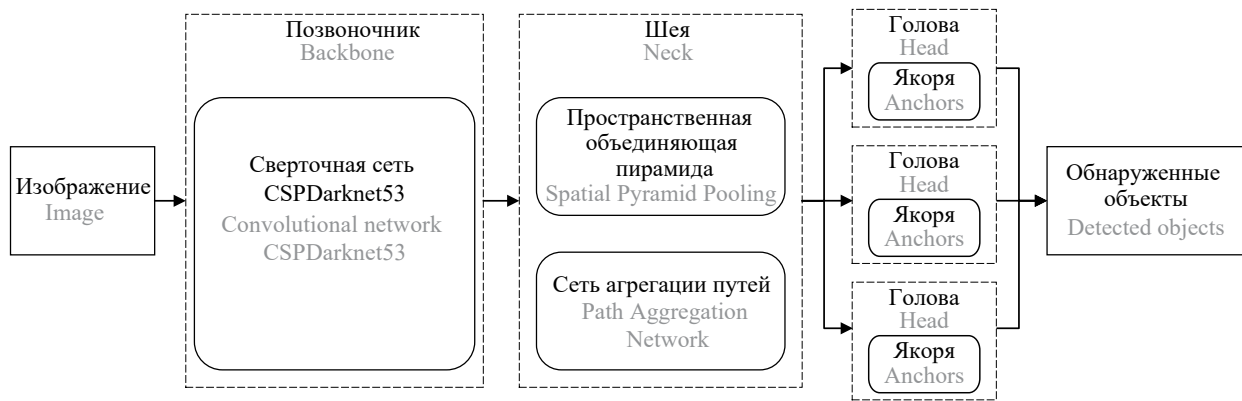


Рис. 2. Схема архитектуры YOLOv5

Fig. 2. YOLOv5 architecture diagram

заранее заданный размер объектов на изображении. В голове их применяется несколько для разных форм объектов. В каждой ячейке определяется, насколько близок найденный объект по форме к каждому якорю, после чего габариты этого объекта корректируются от самого близкого якоря. Кроме того, могут использоваться параллельно несколько голов, с разным набором якорей, например, исходно в YOLOv5 3 головы для мелких объектов, средних и крупных.

Head всегда определяет для каждой ячейки большое количество объектов. Чтобы отфильтровать только нужные объекты, кроме Confidence, применяется метод NMS (non-max suppression). Данный метод применяется с целью убрать сильно пересекающиеся объекты одного класса с высоким значением Confidence и оставить объект с самым высоким значением.

В качестве функции активации в YOLOv5 используется Swish [20] (уравнение (3)). Эта функция — составная, включает сигмоиды и линейную функцию. Swish является сглаженной, немоноотонной, ограниченной снизу и неограниченной сверху функцией:

$$f(x) = x \cdot \text{sigmoid}(x) = \frac{x}{1 + e^{-x}}. \quad (3)$$

Наиболее распространенными алгоритмами оптимизации для обучения нейронных сетей служат стохастический градиентный спуск (Stochastic gradient descent — SGD) [21] и метод адаптивного определения момента (Adaptive moment estimation — Adam) [22, 23].

Принцип SGD заключается в обновлении весов модели на каждом шагу эпохи (epoch). Эпохой называется один полный проход по обучающей выборке. Обновление весов происходит в соответствии с градиентами каждого веса, рассчитанными в соответствии с функцией потерь (loss function) на одной партии (batch) данных. Данные разбиваются на партии, чтобы в обучение за один раз подавалось

столько информации, сколько помещается в памяти вычислителя. Для YOLOv5 функция потерь представляет собой сумму трех составляющих:

$$Loss = L_{cls} + L_{obj} + L_{loc}, \quad (4)$$

где L_{cls} — составляющая, отвечающая за штраф по классу, представляет собой функцию типа Binary Cross Entropy Loss (BCELoss);

L_{obj} — составляющая, отвечающая за штраф по наличию или отсутствию нужного объекта, функция BCELoss;

L_{loc} — составляющая, отвечающая за штраф по позиции найденного объекта, считается как IoU .

Adam является модификацией SGD, основное отличие которого состоит в учетывании градиентов с предыдущих шагов обучения при обновлении весов. Это изменение позволило повысить сходимость обучения, снизив зашумленность в градиентах.

Обучение с использованием Adam осуществляется по следующему алгоритму.

На начальном этапе возможно два варианта. Если используется предобученная (pretrained) готовая модель и выполняется ее дообучение (fine-tuning) на новых данных, то обучение начинается с этими начальными весами. Если обучение происходит с нуля, например, в случае, когда архитектура исходной модели изменена, то веса инициализируются случайным образом.

После этого отмечается итеративный проход по обучающей выборке. На каждом шагу t происходит вычисление по следующим формулам.

В формуле (5) представлен расчет вектора градиентов в нейронной сети:

$$g_t = \nabla_{\theta} f_t(\theta_{t-1}), \quad (5)$$

где g_t — вектор градиент нейронной сети;

θ — вектор обучаемых параметров нейронной сети;

$f_i(\theta_{t-1})$ — функция, характеризующая нейросеть.

Далее по формулам (6)–(9) [22] рассчитываются значения моментов для шага t . Изначально векторы m и v нулевые:

$$m_t = \beta_1 \cdot m_{t-1} + (1 - \beta_1) \cdot g_t; \quad (6)$$

$$v_t = \beta_2 \cdot v_{t-1} + (1 - \beta_2) \cdot g_t^2; \quad (7)$$

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}; \quad (8)$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t}, \quad (9)$$

где β_1 и β_2 — коэффициенты момента;

$\hat{m}_t$ и $\hat{v}_t$ — скорректированные на смещение векторы моментов.

В итоге по формуле (10) [22] рассчитываются новые значения весов:

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \alpha \cdot \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon}, \quad (10)$$

где α — коэффициент скорости обучения (learning rate);

ε — крайне малый добавочный коэффициент, предотвращающий деление на ноль.

Обычно для алгоритма Adam устанавливаются следующие значения: $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$ и $\varepsilon = 10^{-8}$.

Существуют различные методы дополнительного ускорения модели для того, чтобы она могла работать на ограниченных вычислительных ресурсах. В данной работе рассмотрены два метода — квантование (quantization) и прореживание фильтров (filter pruning).

Квантование является процессом перевода значений весов нейронной сети на меньшую битность. Например, 32-битные числа с плавающей точкой можно перевести в 8-битные целые числа, что значительно снижает требования к памяти и вычислительной мощности, но может также привести к потере некоторой точности. Квантование может проводиться как во время обучения, так и после него. Метод не всегда дает положительный результат, так как на некоторых вычислителях операции с плавающей точкой оптимизированы лучше, чем целочисленные.

Прореживание фильтров заключается в удалении из сверточных слоев модели фильтров, наименьшим образом влияющих на результат работы нейронной сети. Так же, как и квантование, оно может проводиться как в процессе обучения, так и после него. Процент удаляемых фильтров может определяться как автоматически во время обучения, так и вручную после обучения.

В случае обоих методов их использование во время обучения дает меньшую потерю точности. Таким образом, если обучение модели с нуля целесообразно, то стоит применять их во время обучения, и только в ином случае после.

Результаты и их обсуждение

В качестве базовой обучена стандартная самая маленькая YOLOv5-small с 800 тыс. обучаемых параметров.

Обучение производилось со значением batch, равным 64, в течение 100 эпох. Данные обучения собраны из открытых источников и вручную размечены. Этот набор разделен на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 80 % / 20 % / 20 %.

В процессе исследования стандартная конфигурация backbone была облегчена путем перебора различных комбинаций параметров нейронной сети. Удалось получить конфигурацию, которая работает быстрее, чем исходная сеть, в 2 раза и дает неболь-

Сравнение метрик разных версий обученных нейронных сетей
Comparison of metrics of different versions trained neural networks

	Метрики / Metrics				
	Валидационный $mAP_{0,5}$ Validation $mAP_{0,5}$	Валидационный $mAP_{0,5-0,95}$ Validation $mAP_{0,5-0,95}$	Тестовый $mAP_{0,5}$ Test $mAP_{0,5}$	Тестовый $mAP_{0,5-0,95}$ Test $mAP_{0,5-0,95}$	Время обработки изображения, мс Image processing time, ms
Исходная Baseline	0,782	0,553	0,781	0,549	10,2
Облегченная Lightweight	0,776	0,548	0,784	0,559	5,2
Облегченная после прореживания фильтров Lightweight after filter pruning	0,773	0,538	0,780	0,557	4,4
Облегченная после квантования Lightweight after quantization	0,775	0,540	0,781	0,556	4,6
Облегченная после прореживания фильтров и квантования Lightweight after filter pruning and quantization	0,778	0,536	0,776	0,554	3,9



Рис. 3. Результат обработки нейронной сетью сгенерированного изображения

Fig. 3. Result of neural network processing of generated image

шой прирост в качестве работы, который объясняется меньшим переобучением.

Результаты обучения для стандартной, облегченной и после применения квантования и прореживания представлены в таблице. Время работы на одном изображении приведено для процессора Intel Core i5-6300U.

К облегченной нейронной сети применено прореживание фильтров. В ходе экспериментов наилучший результат отмечен при показателе прореживания 20 %. Прореживание фильтров реализовывалось с помощью библиотеки NNCF (Neural Network Compression Framework). Время обработки упало до 4,4 мс.

Квантование дало небольшой прирост скорости. Скорость работы на CPU составила 4,6 мс. Качество работы снизилось незначительно.

Квантование также осуществляется с помощью NNCF. Библиотека предоставляет возможность выполнять прореживание фильтров и квантование одновременно, в результате чего получается добиться большего ускорения. В этом случае скорость составила 3,9 мс.



Рис. 4. Результат обработки нейронной сетью фотографии

Fig. 4. Result of neural network processing of photo

Результаты работы нейронной сети на данных из тестовой выборки представлены на сгенерированном изображении пожара на технологическом объекте (рис. 3) и реальной фотографии пожара с заметным дымом (рис. 4).

Выводы

Определена оптимальная архитектура нейронной сети для обнаружения очага возгорания. Этой архитектурой стала YOLOv5, которая является оптимальным выбором по соотношению скорости, качества работы и удобства обучения и применения.

С целью ускорения работы детектора применены методы облегчения нейронной сети, квантования и прореживание фильтров. Их использование в комбинации с подбором оптимальной конфигурации YOLOv5 позволило ускорить нейронную сеть в 2,6 раза. У самой быстрой полученной сети был достигнут показатель $mAP_{0,5}$ на тестовой выборке 0,962. Время обработки одного изображения составило 3,9 мс на процессоре, что позволяет выполнять обработку видео с частотой 256 кадров в секунду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mazur-Milecka M., Glowacka N., Kaczmarek M., Bujnowski A., Kaszynski M., Ruminski Smart J. City and fire detection using thermal imaging // 14th International Conference on Human System Interaction (HSI). 2021. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/HSI52170.2021.9538699
2. Chacon M., Perez-Vargas F. Thermal Video Analysis for Fire Detection Using Shape Regularity and Intensity Saturation Features // Third Mexican Conference MCP. 2011. Pp. 118–126. DOI: 10.1007/978-3-642-21587-2_13
3. 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
4. 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. Pp. 14–27. DOI: 10.5815/ijitcs.2015.04.02

5. Mondal M., Prasad V., Kumar R., Saha N., Saumadeep G., Ratna G., Mukhopadhyay A., Sourav S. Automating Fire Detection and Suppression with Computer Vision: A Multi-Layered Filtering Approach to Enhanced Fire Safety and Rapid Response // *Fire Technol.* 2023. DOI: 10.1007/s10694-023-01392-w
6. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. Pp. 580–587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81
7. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017. Pp. 2980–2988. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322
8. Lin T., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. Pp. 936–944. DOI: 10.1109/CVPR.2017.106
9. Liu Z. et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. Pp. 9992–10002. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00986
10. 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
11. Liu W. 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
12. 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. Issue 2. Pp. 318–327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826
13. Lin T. et al. Microsoft COCO: Common Objects in Context // *ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*. 2014. Vol. 8693. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
14. Sobti A., Arora C., Balakrishnan M. Object Detection in Real-Time Systems: Going Beyond Precision // 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2018. Pp. 1020–1028. DOI: 10.1109/WACV.2018.00117
15. Henderson P., Ferrari V. End-to-End Training of Object Class Detectors for Mean Average Precision // *ACCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*. 2016. Vol. 10115. DOI: 10.1007/978-3-319-54193-8_13
16. Li C., Li L., Geng Y., Jiang H., Cheng M., Zhang B., Ke Z., Xu X., Chu X. YOLOv6 v3.0: A Full-Scale Reloading // *arXiv: Computer Science*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2301.05586
17. Wang C., Yeh I., Liao H. You Only Learn One Representation: Unified Network for Multiple Tasks // *Journal of Information Science and Engineering*. 2021. Vol. 39. Issue 2. Pp. 691–709. DOI: 10.48550/arXiv.2105.04206
18. Wang C., Bochkovskiy A., Liao H. Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. Pp. 13024–13033. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01283
19. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement // *arXiv: Computer Science*. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1804.02767
20. Ramachandran P., Zoph B., Le Q. Swish: a Self-Gated Activation Function // *arXiv: Neural and Evolutionary Computing*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1710.05941
21. Robbins H. A Stochastic Approximation Method // *Annals of Mathematical Statistics*. 1951. Vol. 22. Pp. 400–407. DOI: 10.1214/aoms/1177729586
22. Kingma D., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // *arXiv: Computer Science*. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980
23. Zhang Z. Improved Adam Optimizer for Deep Neural Networks // 2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS). 2018. Pp. 1–2. DOI: 10.1109/IWQoS.2018.8624183

REFERENCES

1. Mazur-Milecka M., Glowacka N., Kaczmarek M., Bujnowski A., Kaszynski M., RuminskiSmart J. City and fire detection using thermal imaging. *14th International Conference on Human System Interaction (HSI)*. 2021; 1-7. DOI: 10.1109/HSI52170.2021.9538699
2. Chacon M., Perez-Vargas F. Thermal Video Analysis for Fire Detection Using Shape Regularity and Intensity Saturation Features. *Third Mexican Conference MCPR*. 2011; 118-126. DOI: 10.1007/978-3-642-21587-2_13
3. 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

4. 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; 14-27. DOI: 10.5815/ijitcs.2015.04.02
5. Mondal M., Prasad V., Kumar R., Saha N., Saumadeep G., Ratna G., Mukhopadhyay A., Sourav S. Automating Fire Detection and Suppression with Computer Vision: A Multi-Layered Filtering Approach to Enhanced Fire Safety and Rapid Response. *Fire Technol.* 2023. DOI: 10.1007/s10694-023-01392-w
6. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014; 580-587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81
7. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017; 2980-2988. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322
8. Lin T., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017; 936-944. DOI: 10.1109/CVPR.2017.106
9. Liu Z. et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows. *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2021; 9992-10002. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00986
10. 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
11. Liu W. 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
12. 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; 42(2):318-327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826
13. Lin T. et al. Microsoft COCO: Common Objects in Context. *ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*. 2014; 8693. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
14. Sobti A., Arora C., Balakrishnan M. Object Detection in Real-Time Systems: Going Beyond Precision. *2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. 2018; 1020-1028. DOI: 10.1109/WACV.2018.00117
15. Henderson P., Ferrari V. End-to-End Training of Object Class Detectors for Mean Average Precision. *ACCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*. 2016; 10115. DOI: 10.1007/978-3-319-54193-8_13
16. Li C., Li L., Geng Y., Jiang H., Cheng M., Zhang B., Ke Z., Xu X., Chu X. YOLOv6 v3.0: A Full-Scale Reloading. *arXiv: Computer Science*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2301.05586
17. Wang C., Yeh I., Liao H. You Only Learn One Representation: Unified Network for Multiple Tasks. *Journal of Information Science and Engineering*. 2021; 39(2):691-709. DOI: 10.48550/arXiv.2105.04206
18. Wang C., Bochkovskiy A., Liao H. Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network. *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021; 13024-13033. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01283
19. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement. *arXiv: Computer Science*. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1804.02767
20. Ramachandran P., Zoph B., Le Q. Swish: a Self-Gated Activation Function. *arXiv: Neural and Evolutionary Computing*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1710.05941
21. Robbins H. A Stochastic Approximation Method. *Annals of Mathematical Statistics*. 1951; 22:400-407. DOI: 10.1214/aoms/1177729586
22. Kingma D., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. *arXiv: Computer Science*. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980
23. Zhang Z. Improved Adam Optimizer for Deep Neural Networks. *2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. 2018; 1-2. DOI: 10.1109/IWQoS.2018.8624183

Поступила 24.07.2023, после доработки 05.09.2023;

принята к публикации 12.09.2023

Received July 24, 2023; Received in revised form September 5, 2023;

Accepted September 12, 2023

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; ORCID: 0009-0007-4974-7948; e-mail: andrejev4@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; ORCID: 0009-0007-4974-7948; e-mail: andrejev4@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 RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311, e-mail: ivs@gubkin.ru

Contribution of the authors:

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

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

The authors declare no conflicts of interests.

Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко,
Владимир Иванович Зыков, Александр Львович Холостов,
Тимур Игоревич Чистяков

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара используются вспучивающиеся огнезащитные покрытия, эффективность применения которых в случае реального режима пожара не исследована.

Цели и задачи. Целью статьи является экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок, обработанных вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской «Огнеза-ВД-К». При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

Методы. Экспериментальное исследование нагрева в муфельной печи образцов проводов и кабелей, обработанных вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской. Анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости удельного сопротивления, индуктивности и емкости распространенных электрических кабелей от температуры окружающего кабель воздуха.

Обнаружено, что для всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание произошло при температуре окружающей среды в диапазоне 180–230 °С без увеличения в объеме огнезащитного покрытия до размеров, обеспечивающих защиту кабеля от внешнего теплового воздействия. При этом фазы и амплитуды входного электрического сигнала могут существенно изменяться до наступления короткого замыкания. Выявлено, что вспучивание огнезащитной краски при режиме пожара в муфельной печи происходит при 400 °С, а не при 200 °С как в случае стандартных испытаний.

Показано, что динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности.

Выводы. Работоспособность электрических проводов и кабелей, обработанных огнезащитным вспучивающимся составом, необходимо определять в условиях реальных режимов пожара в помещениях, где используются эти провода и кабели.

Ключевые слова: огнезащита; силовой кабель; сигнальный кабель; температурный режим; изоляция; терморазложение

Для цитирования: Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Холостов А.Л., Чистяков Т.И. Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 49–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-59

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

Experimental evaluation of the efficiency of application of intumescent flame retardant coatings for electric wires and cables under simultaneous fire and current load impact

Sergey V. Puzach , Olga S. Lebedchenko, Vladimir I. Zykov, Aleksander L. Kholostov, Timur I. Chistyakov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In order to preserve the operability of wires and cables in fire conditions, intumescent flame retardant coatings are used, the effectiveness of their application in the case of real fire mode has not been investigated.

Aims and purposes. The purpose of the article is to evaluate experimentally the effectiveness of the use of intumescent flame retardant coatings for electrical wires and cables under simultaneous exposure to fire and current load. In order to achieve this purpose, experimental tests on wires and cables of different brands, treated with intumescent water dispersion fire-protective paint "Ogneza-VD-K". At the same time, the influence of heated ambient temperature on electrical parameters of wires and cables, such as resistivity, inductance and capacitance, was assessed.

Methods. Experimental study of heating in a muffle furnace of wire and cable samples treated with intumescent water-dispersion fire-retardant paint. Analysis of the obtained results.

Results and their discussion. The dependences of resistivity, inductance and capacitance of common electrical cables on ambient air temperature are obtained.

It was found that for all considered cables, the short circuit occurred at ambient temperatures in the range of 180–230 °C increasing the fireproofing coating to dimensions that protect the cable from external thermal impact. In this case, the phases and amplitudes of the input electrical signal can change significantly before a short circuit occurs.

It has been found that the swelling of fire retardant paint under fire conditions in a muffle furnace occurs at 400 °C and not at 200 °C as in the case of standard tests.

It is shown that the dynamics of temperature change inside the muffle furnace approached the temperature regime of a real fire in the room of the MCPU (Main circulation pump units) section of the Leningrad NPP (containment) of the reactor building and in the cable room of the 3rd safety channel of the safety building.

Conclusions. Working capacity of electric wires and cables treated with flame retardant should be determined in real fire conditions in the premises where these wires and cables are used.

Keywords: fire protection; power cable; signal cable; temperature regime; insulation; thermal decomposition

For citation: Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Kholostov A.L., Chistyakov T.I. Experimental evaluation of the efficiency of application of intumescent flame retardant coatings for electric wires and cables under simultaneous fire and current load impact. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):49-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-59 (rus).

 Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

Введение

Нарушение температурных режимов эксплуатации электрических проводов и кабелей негативно сказывается на выполнении ими своих функций, связанных как с передачей управляющих сигналов [1–5], так и с работой под токовой нагрузкой [6–9]. Повышение температуры ухудшает состояние изоляции и приводит к нарушению ее свойств с существенным сокращением срока службы самих проводов и кабелей [10–16].

Повышение температуры изоляции электрических проводов и кабелей может привести к терморазложению изоляции и последующему короткому замыканию [7, 10, 11, 17]. В силовых цепях может образоваться источник зажигания (в случае неисправности элементов защиты силовых цепей), а в цепях управления — потеря контроля за состоянием техно-

логического процесса [11, 14, 18, 19], что может также привести к серьезным техногенным авариям и пожарам.

Кроме того, материалы, из которых изготовлена изоляция, сами являются источниками образования токсичных веществ и усложняют процессы эвакуации людей в случае пожара и работу пожарных [5, 9, 20, 21].

Защита электрических проводов и кабелей от теплового воздействия пожара может осуществляться с использованием вспучивающихся огнезащитных составов [3]. При нагреве огнезащитного покрытия после достижения температуры вспучивания происходит существенное увеличение толщины огнезащитного слоя, что предотвращает возникновение процесса терморазложения изоляции и, следовательно, короткого замыкания.

Научных исследований эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки за исключением работы [3] практически нет.

В вышеуказанной работе представлены результаты экспериментальных испытаний, проведенных на специально разработанной установке, эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий при различных режимах пожара. Обнаружено, что в ряде случаев процесс терморазложения изоляции начинается, когда еще не происходит начало вспучивания огнезащитного состава (исключением является углеводородный режим пожара). Однако теоретически предсказать на данном этапе исследований возникновение короткого замыкания, а также изменение параметров проходящего по кабелю электрического сигнала не представляется возможным.

Поэтому актуальной задачей является проведение экспериментов по исследованию теплового воздействия реального пожара на работоспособность проводов и кабелей с нанесенным на их наружную поверхность огнезащитным слоем.

Целью статьи является экспериментальная оценка одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на эффективность применения вспучивающихся огнезащитных составов, наносимых на изоляцию электрических проводов и кабелей.

Опытные испытания на экспериментальной установке [4] проводились для проводов и кабелей различных марок, которые использовались в работе [4] без нанесенного огнезащитного слоя. В данной работе на вышеуказанные провода и кабели были нанесены огнезащитные слои вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» ТУ 2313-004-92450604–2013 (в точном соответствии с рекомендациями производителя). В процессе экспериментов измерялись удельное сопротивление, индуктивность и емкость проводников, а также визуально сравнивались амплитуда, частота, фаза и форма сигнала в испытуемом образце с образцовым сигналом.

Стандартные испытания на работоспособность

Исследование сохранения работоспособности кабелей (как электрических, так и оптических) при воздействии на них пламени выполняется по методике, изложенной в ГОСТ Р МЭК 60331-21–2003 Государственный стандарт Российской Федерации¹.

¹ ГОСТ Р МЭК 60331-21–2003. Государственный стандарт Российской Федерации. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. Часть 21. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели на номинальное напряжение до 0,6/1,0 кВ включительно (принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 19.03.2003 № 83-ст).

Испытания предполагают воздействие на исследуемый образец пламени, температура которого превышает 750 °С, что гарантированно обеспечивает вспучивание огнезащитного слоя. Но пороговое значение температуры в 750 °С гораздо выше температуры разрушения (деструкции) ряда материалов, используемых в изоляции проводов и кабелей. В условиях реального пожара, как это показано в работе [3], терморазложение материала изоляции может наступить ранее, чем проявятся защитные свойства вспучивающегося огнезащитного покрытия.

Эффективность огнезащитных составов определяется в соответствии с ГОСТ Р 59637–2021² при стандартном режиме пожара, обеспечивающем быстрое нагревание покрытия в течение 5 мин до температуры 600 °С. Начальная температура, при которой начинают проявляться огнезащитные свойства различных красок, находится в диапазоне 200–400 °С. В этом случае из-за быстрого нагрева температура изоляции не успевает достигнуть температуры ее терморазложения (130–170 °С) до момента вспучивания огнезащитного слоя. Напомним, что защитные свойства вспучивающейся огнезащитной краски наиболее эффективно проявляются при температуре выше 600 °С.

Как отмечалось ранее в работе [3], при реальных режимах пожара температура в помещении существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Это может привести к тому, что до начала вспучивания огнезащитного слоя произойдет терморазрушение слоя изоляции [3].

Исследование возникновения короткого замыкания необходимо проводить с одновременным измерением амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, проходящего через испытуемый образец кабеля, так как эти характеристики тоже будут изменяться в определенные моменты времени. Такие изменения необходимо учитывать при эксплуатации реальных объектов в аварийных режимах.

Для того чтобы исключить рассмотренные недостатки стандартного метода испытаний в работе [4], была разработана опытная установка, которая позволяет исследовать влияние динамики изменения температуры окружающей провода и кабеля среды на работоспособность кабелей, покрытых огнезащитными составами. Регулируемая скорость прогрева таким образом позволила исследовать поведение защитных составов и изоляции кабелей в условиях различных пожаров.

² ГОСТ Р 59637–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Натурные испытания проводов и кабелей проводились на установке [4], разработанной для этих целей, состав которой можно видеть на рис. 1.

Электрический сигнал синусоидальной формы частотой 200 кГц и напряжением 2 В с одного из выходов генератора гармонических колебаний 1 подается на испытываемый образец провода или кабеля (далее — образец), находящийся в печи муфельной 2 ступенчатого нагрева.

Сигнал, прошедший через испытываемый образец, поступает на один из входов осциллографа аналогового двухлучевого 3 для сравнения с исходным синусоидальным сигналом. Образцовый сигнал поступает на второй вход осциллографа напрямую без изменений. Оба сигнала отражаются на экране, что позволяет проводить их сравнение и визуализировать возможные изменения амплитуды, частоты, фазы и формы сигнала, прошедшего через испытываемый образец.

Анализатор спектра электрических сигналов 4 позволяет отследить возможное появление дополнительных гармоник при нелинейных искажениях сигнала, прошедшего через испытываемый образец, а также оценить уровень шума при нарастании температуры.

В камере муфельной печи изучаемый образец подвергался воздействию ступенчато нарастающей температуры с целью установления зависимостей от нее таких электрических параметров, как активное

сопротивление R , емкость C , индуктивность L . При стабилизации ступенчато нарастающей температуры на каждом шаге последовательно считывались электрические параметры с индикаторов измерителей (тестеров) активного сопротивления 5, индуктивности 6 и емкости 7.

В дополнение к полученным данным визуально контролировалось состояние защитного покрытия, нанесенного на образцы.

Экспериментальные образцы проводов и кабелей

Были подготовлены образцы следующих электрических проводов и кабелей (как в работе [4]):

- кабельная линия типа «витая пара»;
- кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$;
- кабельная линия типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$.

Нанесение слоев вспучивающейся огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» на экспериментальные образцы производилось в точном соответствии с рекомендациями производителя (ТУ 2313-004-92450604–2013).

Чтобы обеспечить равномерность нагрева образцов, обработанных вспучивающейся краской, они были подготовлены в форме спирали (рис. 2).

Длина кабелей в нагреваемых образцах равна: медный кабель витой пары — 7,0 м; кабель со стальными проводами типа ПНСВ $1 \times 1,2$ — 15,0 м; кабель с медными проводами типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ — 6,0 м.

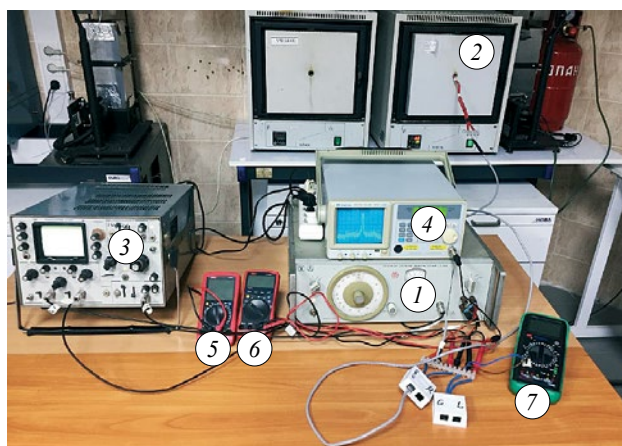


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — генератор гармонических колебаний; 2 — печь муфельная; 3 — осциллограф аналоговый двухлучевой; 4 — анализатор спектра электрических сигналов; 5 — измеритель активного электрического сопротивления; 6 — измеритель электрической индуктивности; 7 — измеритель электрической емкости

Fig. 1. Scheme of experimental installation: 1 — harmonic oscillation generator; 2 — muffle furnace; 3 — analog dual-beam oscilloscope; 4 — electrical signal spectrum analyzer; 5 — active electrical resistance meter; 6 — electric inductance meter; 7 — capacitance meter

Результаты экспериментов и их анализ

Зависимости экспериментальных значений измеряемых параметров кабелей от температуры в муфельной печи в случае кабельной линии типа «витая пара» (два эксперимента) представлены в табл. 1 и 2, для кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$ приведены в табл. 3 и кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ — в табл. 4.

Из табл. 1–4 видно, что при нагреве всех кабелей до температуры в муфельной печи в диапазоне 180–230 °С происходит короткое замыкание. При этом не обнаружено вспучивания огнезащитного покрытия. Поэтому становится невозможной передача электрического сигнала по кабелю.

Вспучивание водно-дисперсионной огнезащитной краски «Огнеза-ВД-К» в условиях стандартных испытаний происходит при температуре 200 °С (ТУ 2313-004-92450604–2013). Выполненные эксперименты показали, что в случае температурного режима в муфельной печи процесс вспучивания начинается при температуре 400 °С. При этом

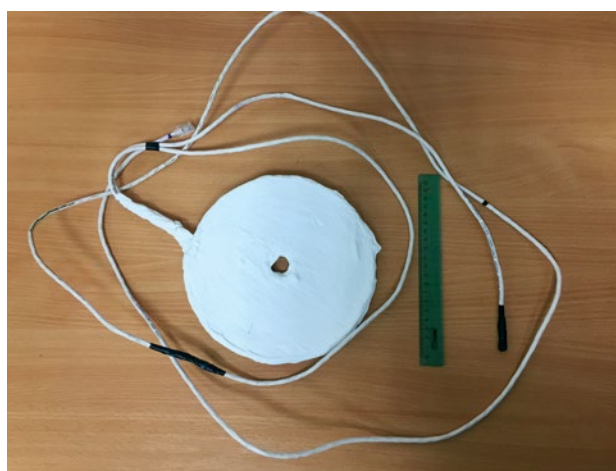
*a**b**c**d*

Рис. 2. Экспериментальные образцы: *a* — кабель типа «витая пара» в муфельной печи после воздействия температуры 170 °С; *b* — провод типа КМВЭВ 1 × 2 × 1,5; *c* — двухжильный нагревательный провод типа ПНСВ 1 × 1,2; *d* — кабель типа «витая пара»

Fig. 2. Experimental samples: *a* — twisted-pair cable in a muffle furnace after exposure to temperature of 170 °С; *b* — wire of KMVEV type 1 × 2 × 1.5; *c* — two-core heating wire of PNSV type 1 × 1.2; *d* — twisted pair cable

огнезащитное покрытие при максимальной температуре 230 °С возникновения короткого замыкания остается без изменений.

На рис. 3 показан внешний вид образца кабеля до и после вспучивания огнезащитного покрытия. Коэффициент вспучивания оказался равным 5, в то время как при стандартных испытаниях он равен 20.

Сдвиг фазы синусоидального сигнала начался при температуре 120 °С (провод типа ПНСВ 1 × 1,2, табл. 3). При повышении температуры внутри муфельной печи до 170 °С обнаружено начало возникновения скачков амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала. Стабильный характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала начинается с температуры 180 °С и выше.

В случаях витой пары (табл. 1 и 2) и кабельной линии КМВЭВ 1 × 2 × 1,5 (табл. 4) изменения амплитуды выходного сигнала и фазы не обнаружено.

Результаты опытов показали, что в случае постепенного нагрева электрического провода или кабеля конечным итогом является короткое замыкание между его токопроводящими жилами и, вследствие этого, прекращение передачи электрического сигнала. Таким образом, огнезащитные вспучивающиеся покрытия, имеющие температуру начала вспучивания в интервале от 180 до 250 °С, не позволяют сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара (как теоретически предсказано в работе [3]).

Таблица 1. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа «витая пара» (эксперимент № 1)**Table 1.** Influence of temperature on parameters of twisted pair cable line (experiment No. 1)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$ $R, \text{ Ohm}$	$C, \text{ пФ}$ $C, \text{ pF}$	$L, \text{ мГн}$ $L, \text{ mH}$	Примечания Notes
20	8,9	2,09	0,027	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
155	8,9	2,10	0,027	
175	9,1	2,10	0,027	
185	9,6	2,10	0,027	
195	9,8	2,10	0,023	Короткое замыкание проводников. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell

Таблица 2. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа «витая пара» (эксперимент № 2)**Table 2.** Influence of temperature on parameters of twisted pair cable line (experiment No. 2)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$ $R, \text{ Ohm}$	$C, \text{ пФ}$ $C, \text{ pF}$	$L, \text{ мГн}$ $L, \text{ mH}$	Примечания Notes
20	9,7	2,21	0,026	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
100	9,8	2,25	0,026	
125	9,8	2,24	0,026	
135	10,2	2,23	0,026	
145	10,6	2,22	0,026	
155	10,7	2,22	0,028	
165	10,8	2,23	0,028	
175	10,6	2,28	0,028	
180	5,8	2,33	0,027	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short circuit. The flame retardant coating did not swell
175	5,5	—	0,026	Развитие процесса короткого замыкания на остывании Development of the cooling short circuit process

Например, обнаружено, что короткое замыкание образца кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ произошло при $220 ^\circ\text{C}$ (табл. 4). Последующий нагрев до температуры $300 ^\circ\text{C}$ показал, что вспучивания огнезащитного слоя не произошло. Этот факт подтверждает внешний вид образца при температуре $300 ^\circ\text{C}$ (рис. 4). В начале нагрева огнезащитное покрытие было целостное, затем оно частично

Таблица 3. Влияние температуры на параметры кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$ **Table 3.** Influence of temperature on parameters of a cable line made of a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$ $R, \text{ Ohm}$	$C, \text{ пФ}$ $C, \text{ pF}$	$L, \text{ мГн}$ $L, \text{ mH}$	Примечания Notes
20	5,3	0,510	0,242	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
100	5,8	0,684	0,249	
110	5,8	1,088	0,256	
120	6,5	1,654	0,262	Сдвиг фазы синусоидального сигнала. Огнезащитное покрытие не вспучилось Phase shift of the sinusoidal signal. The flame retardant coating did not swell
130	6,4	1,658	0,265	
145	6,5	1,639	0,269	
160	6,7	1,618	0,272	
170	7,0	1,599	0,277	
180	7,3	1,588	0,283	
200	7,3	1,645	0,288	
215	7,8	1,846	0,294	
230	> 5,2	—	> 0,200	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell

Таблица 4. Влияние температуры на параметры кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ **Table 4.** Influence of temperature on parameters of the cable line type KMVEV $1 \times 2 \times 1.5$

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$ $R, \text{ Ohm}$	$C, \text{ пФ}$ $C, \text{ pF}$	$L, \text{ мГн}$ $L, \text{ mH}$	Примечания Notes
20	1,4	0,894	0,006	Огнезащитное покрытие не вспучилось The flame retardant coating did not swell
120	1,5	1,378	0,007	
145	1,8	1,403	0,007	
160	1,9	1,437	0,007	
170	2,1	1,478	0,007	
180	1,4	1,595	0,007	
200	1,3	2,31	0,007	Появление дыма в результате терморазложения изоляции кабеля. Огнезащитное покрытие не вспучилось The appearance of smoke as a result of thermal decomposition. The flame retardant coating did not swell
210	1,5	5,86	0,007	
220	1,4	—	—	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось Short-circuit of the conductors. The flame retardant coating did not swell



a



b

Рис. 3. Внешний вид образца кабеля типа ПНСВ $1 \times 1,2$, обработанного огнезащитным покрытием «Огнеза-ВД-К», до вспучивания при $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) и после вспучивания при $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

Fig. 3. Appearance of cable sample PNSV 1×1.2 type with fireproof coating “Ogneza-VD-K” before swelling at $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and after swelling at $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

лопнуло вследствие температурного расширения и последующего плавления изоляции кабеля.

Сравнение температурных режимов пожара, полученных в муфельной печи и при реальных пожарах, рассчитанных в работе [22] для участка ГЦНА гермообъема реакторного здания Ленинградской АЭС и кабельного помещения 3-го канала



Рис. 4. Внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$ при нагреве до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Appearance of a sample of a cable line of the KMVEV type $1 \times 2 \times 1.5$ after heating to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T, ^{\circ}\text{C}$

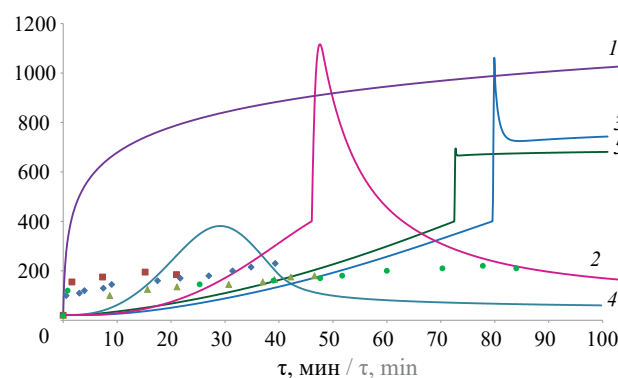


Рис. 5. Зависимость температуры от времени с начала пожара: участок ГЦНА (гермообъем): 1 — стандартный пожар; 2 — реальный пожар (закрытые двери); 3 — реальный пожар (открытые двери); кабельное помещение 3-го канала безопасности; 4 — реальный пожар (закрытые двери); 5 — реальный пожар (открытые двери). Маркерами обозначены температурные режимы при проведении экспериментов с кабелями в муфельной печи

Fig. 5. Dependences of temperatures on the time from the beginning of the fire: MCPU section (containment): 1 — standard fire; 2 — real fire (closed doors); 3 — real fire (open doors); cable room of the 3rd security channel; 4 — real fire (closed doors); 5 — real fire (open doors). Markers temperature regimes when conducting experiments with cables in a muffle furnace

безопасности здания безопасности, приведено на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в случае реального пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности. Поэтому тепловое воздействие на кабели внутри печи близко к аналогичному воздействию в реальных полномасштабных помещениях АЭС. Это позволяет распространить результаты маломасштабных опытов на реальные полномасштабные помещения.

Полученные результаты позволяют предположить существенное влияние темпа нагрева на процесс вспучивания огнезащитного покрытия.

Выводы

Нагрев всех рассматриваемых в работе кабелей при одновременном влиянии пожара и токовой нагрузки до температуры в диапазоне 180–230 °С привел к короткому замыканию. При этом не произошло увеличение толщины огнезащитного покрытия до величины, обеспечивающей защиту кабеля от внешнего теплового воздействия вспучиванием вышеуказанного покрытия. При этом из-за нарушения изоляции и возникновения короткого замыкания передача электрического сигнала по кабелю становится невозможной.

Таким образом, необходимо определять работоспособность электрических проводов и кабелей, обработанных огнезащитным вспучивающимся составом в условиях реальных режимов пожара в помещениях, где используются эти провода и кабели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедченко О.С., Зыков В.И., Пузач С.В. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 4. С. 51–58. DOI: 10.22257/0869-7493.2020.29.04.51-58
2. Лебедченко О.С. Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. «Ройтмановские чтения». М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 72–75.
3. Лебедченко О.С., Пузач С.В., Зыков В.И. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 4. С. 36–47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47
4. Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Чистяков Т.И. Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 56–67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67
5. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 75–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80
6. Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малащенко Г.Н. Противопожарная защита электрических сетей от токов утечки // Снижение риска гибели людей при пожарах : мат. XVIII науч.-практ. конф. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 2003. С. 182–185.
7. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с. ISBN 978-5-9901554-2-8.
8. Пехотиков В.А., Болодьян И.А., Рябиков А.И., Грузинова О.И. Пожар на останкинской телебашне в 2000 году. Хроника событий // Пожарная безопасность. 2017. № 4. С. 108–112.
9. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behaviour of electrical cables // Conference SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”. Toronto, 2007.
10. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance // Journal of electrical insulation IEEE. 1986. Vol. 2-H 4. P. 128.
11. US DOE/NRC/EPRI. Cable Research in Light Water Reactor Related to Mechanisms of Cable Degradation: Understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations. 2013.
12. IAEA, Assessing and Managing Cable Ageing In Nuclear Power Plants; NP-T3. 6, Vienna, 2012.
13. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2013.
14. SAND 2015-1794. Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants : a Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring. 2015.
15. CNSC, 13395-REP-00001. “Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations”. September 2012.

16. Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C. Fire performance of Wire and Cable: Reaction to Fire Tests — a Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts. NIST Technical Note 1291, Dec. 1991.
17. Edvard Csanyi. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources) // EEP — Electrical Engineering Portal. 2019, 29 April. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
18. International Atomic Energy Agency, Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants // Final Results of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC1825. Vienna, 2017.
19. Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. NEA/CSNI/R(2018)8 // Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. 2018. 58 p. URL: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2018\)8&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En)
20. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Анализ особенностей горения полимерной изоляции кабелей при их групповой прокладке // Наука и техника. 2010. № 5 (324). С. 10–14.
21. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony C.H. Cheng and WK Chow: “Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment” // Journal of Fire Sciences. 2019. DOI: 10.1177/0734904119860410
22. Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях атомных электростанций с водно-водяными реакторами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 304 с.

REFERENCES

1. Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Puzach S.V. Evaluation of functioning of signal cables of safety channels in nuclear stations under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):51-58. DOI: 10.22257/0869-7493.2020.29.04.51-58 (rus).
2. Lebedchenko O.S. *Assessment of ensuring correct operation of nuclear power plant safety channel cables in fire conditions : collection of materials of the 8th scientific and practical conference “Roitman readings”*. Moscow, Academy of GPS of EMERCOM of Russia, 2020; 72-75. (rus).
3. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Zykov V.I. Application efficiency of swelled up fire-protective coatings for power cables of safety systems channels in nuclear stations under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):36-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47 (rus).
4. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Chistyakov T.I. Operability evaluation of electrical wires and cables subjected to simultaneous fire and current loadings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):56-67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67 (rus).
5. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Evaluation of the Toxicity of Flame Retardant Signal Cables in Case of Fire in the Industrial Premises. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:75-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80 (rus).
6. Zykov V.I., Anisimov Yu.N., Malashenkov G.N. Fire protection of electrical networks from leakage currents. *Reducing the risk of loss of life in fires : materials of the XVIII scientific-practical Conf. Part 1*. Moscow, VNIPO, 2003; 182-185. (rus).
7. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical installations*. Moscow, LLC “Cable”, 2009; 328 (rus).
8. Pekhotikov V.A., Bolodyan I.A., Ryabikov A.I., Gruzinova O.I. Fire at the Ostankino TV tower in 2000 Chronicle of events. *Fire safety*. 2017; (4):108-112.
9. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behaviour of electrical cables. *Conference SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”*. Toronto, 2007.
10. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance. *Journal of electrical insulation IEEE*. 1986; 2-H 4:128.
11. US DOE/NRC/EPRI: “Cable Research in Light Water Reactor Related to Mechanisms of Cable Degradation: Understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations...”. 2013.
12. IAEA, Assessing and Managing Cable Ageing In Nuclear Power Plants; NP-T3.6. Vienna, 2012.
13. SAND 2013-2388. *NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2013.
14. SAND 2015-1794. *Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants : a Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring*. 2015.
15. CNSC, 13395-REP-00001. “Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations”. September 2012.

16. Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C. *Fire performance of Wire and Cable: Reaction to Fire Tests — A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts*. NIST Technical Note 1291, Dec. 1991.
17. Edvard Csanyi. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). *EEP — Electrical Engineering Portal*. 2019, 29 April. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
18. International Atomic Energy Agency, Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. *Final Results of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC1825*. Vienna, 2017.
19. Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project. NEA/CSNI/R(2018)8. *Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations*. 2018; 58. URL: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2018\)8&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En)
20. Meshchanov G.I., Kholodnyy S.D. Analysis of the burning characteristics of polymer insulation of cables during their group laying. *Science and technology*. 2010; 5(324):10-14. (rus).
21. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony C.H. Cheng and WK Chow: “Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment”. *Journal of Fire Sciences*. 2019. DOI: 10.1177/0734904119860410
22. Puzach S.V., Lebedchenko O.S. *Mathematical modeling of the dynamics of fire hazards in passive fire protection in the main buildings of nuclear power plants with water-cooled reactors : monograph*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 304. (rus).

Поступила 30.08.2023, после доработки 05.09.2023;

принята к публикации 18.09.2023

Received August 20, 2023; Received in revised form September 5, 2023;

Accepted September 18, 2023

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, 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; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна, канд. юр. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, 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; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

ЗЫКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор 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; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, 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; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Olga S. LEBEDCHENKO, Cand. Sci. (Legal), Docent, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, 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; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

Vladimir I. ZYKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Professor 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; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

ХОЛОСТОВ Александр Львович, д-р техн. наук, доцент, профессор 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; ORCID: 0000-0003-2299-4221; e-mail: a.holostov@academygps.ru

ЧИСТЯКОВ Тимур Игоревич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, 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; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Aleksander L. KHOLOSTOV, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor 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; ORCID: 0000-0003-2299-4221; e-mail: a.holostov@academygps.ru

Timur I. CHISTYAKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Thermal Physics and Hydraulic Department, 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; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова

Олег Сергеевич Малютин¹✉, Ренат Шамильевич Хабибулин²

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

² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наилучшим образом подобранные параметры количества, размещения и технической оснащенности подразделений экстренных служб позволяют снизить ущерб от пожаров. Для оценки направлений совершенствования такой деятельности предлагается обобщить и проанализировать накопленный в России опыт.

Цели и задачи. Целью работы является получение углубленного представления об актуальных отечественных подходах, методах и алгоритмах обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова. В соответствии с целью поставлены задачи:

- 1) выявление научных школ, занимающихся вопросами проектирования гарнизонов пожарной охраны;
- 2) определение основных методов решения задач проектирования гарнизонов пожарной охраны;
- 3) формулирование перспективных направлений совершенствования задач проектирования гарнизонов пожарной охраны.

Материалы и методы. В исследовании использованы методы литературного обзора: деконструкция литературных источников, анализ с использованием логических заключений на основе анализа графовой модели данных рассмотренных публикаций. Основным источником информации является научная электронная библиотека Elibrary.ru.

Результаты и обсуждение. Ключевая роль в развитии идей организационного проектирования экстренных служб в России принадлежит АГПС МЧС России и ВНИИПО МЧС России. Наиболее развитыми и применяемыми методами решения задач проектирования экстренных служб являются методы имитационного моделирования с использованием компьютерных технологий и методы математического моделирования. Не рассматриваются или редко упоминаются такие методы, как анализ больших данных, машинное обучение, открытые геопространственные данные, современные языки и технологии программирования.

Выводы. К числу перспективных направлений совершенствования задач организационного проектирования экстренных служб относятся современные методы аналитики больших данных, пространственного анализа, инструментов ГИС, продвинутые алгоритмы теории графов и методы машинного обучения.

Ключевые слова: размещение пожарных подразделений; скорость следования; гарнизон; экстренные службы; моделирование; оптимизация; статистика

Для цитирования: Малютин О.С., Хабибулин Р.Ш. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 60–77. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.60-77

✉ Малютин Олег Сергеевич, e-mail: malyutin@sibpsa.ru

Approaches, methods and algorithms for substantiating management decisions to reduce the fire units arrival time

Oleg S. Malyutin¹✉, Renat Sh. Khabibulin²

¹ Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Zheleznogorsk, Russian Federation

² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The best selected parameters of the quantity, location and technical equipment of emergency services allow to reduce the damage from fires. To assess the directions of improvement of such activity, it is proposed to generalize and analyze Russian experience.

Goals and objectives. The purpose of this work is to obtain a deeper understanding about current Russian approaches, methods and algorithms on the basis of which management decisions can be made to reduce the time of arrival of fire brigades to the place of an emergency call. In accordance with the aims, the tasks are set:

- 1) identification of scientific schools dealing with the design of fire protection garrisons;
- 2) determination of the main methods of solving the problems of designing fire protection garrisons;
- 3) formulation of perspective directions for improving fire protection garrisons design.

Materials and methods. The research used methods of literary review: deconstruction of literature sources, analysis using logical conclusions on the basis of graph model data of the reviewed publications. The main source of information is the scientific electronic library Elibrary.ru.

Results and discussion. The key role in the development of the ideas of organizational design of emergency services in Russia belongs to the Academy of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation and VNIIPPO EMERCOM of Russia. The most developed and applied methods of solving problems of emergency services design are methods of simulation modelling with the use of computer technologies and methods of mathematical modelling. Such methods as big data analysis, machine learning, open geospatial data, modern programming languages and technologies are not considered or rarely mentioned.

Conclusions. Promising directions for improving the tasks of organizational design of emergency services include modern methods of big data analytics, spatial analysis, tools of Geospatial Information Systems, advanced graph theory algorithms and machine learning methods.

Keywords: location of fire stations; response speed; garrison; emergency services; modelling; optimization; statistic

For citation: Malyutin O.S., Khabibulin R.Sh. Approaches, methods and algorithms for substantiating management decisions to reduce the fire units arrival time. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):60-77. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.60-77 (rus).

✉ Oleg Sergeevich Malyutin, e-mail: malyutin@sibpsa.ru

Введение

Одним из ключевых показателей, рассматриваемых при оценке качества защиты населенных пунктов от пожаров, является время прибытия первого пожарного подразделения к месту вызова. Согласно статистике, большая часть людей, пострадавших при пожарах, погибает до времени прибытия пожарных подразделений, равного 10 мин [1, табл. 51]. В Федеральном законе № 123-ФЗ¹ установлено, что время прибытия первого пожарного подразделения должно составлять не менее 10 мин в пределах городских населенных пунктов и 20 мин — сельских.

Расчетные методы определения оптимального размещения вновь создаваемых пожарных подразделений в Российской Федерации с учетом названных требований оформлены в виде свода правил СП 11.13130.2009² и ряда методических рекомендаций^{3, 4, 5}. Последние

на сегодняшний день отменены, однако изложенные в них методики по-прежнему представляют научный интерес. В 2021 г. был издан приказ МЧС России от 15 октября 2021 г. № 700⁶, определяющий подход к расчету численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны.

В России тема определения оптимального размещения новых пожарных подразделений наиболее глубокую проработку получила в работах научных коллективов Академии ГПС МЧС России [2, 3] и ВНИИПО МЧС России [4–7]. Результатами работы этих коллективов стали программные решения КИС КОСМАС [2, 3] и АСОП-ПО [8], предназначенные для проектирования гарнизонов пожарной охраны и экстренных служб крупных населенных пунктов. Данные программные решения располагают обширным функционалом, позволяющим в том числе определять оптимальные места размещения пожарных подразделений.

Объем вышедших в последние годы публикаций, посвященных разработке и практическому применению методов расчетного обоснования мест размещения и ресурсной оснащенности пожарных подразделений, существенен.

Изучение литературных источников показало наличие значительного количества публикаций как в России, так и за рубежом. Качественно осветить все эти публикации в рамках одной публикации едва ли представляется возможным. В связи с чем данная работа посвящена обзору только отечественных работ, касающихся проблематики проектирова-

¹ Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

² СП 11.13130.2009. «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения».

³ Методические рекомендации по определению мест размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений // Утверждены Главным Государственным инспектором Российской Федерации по пожарному надзору 30.12.2009 № 2-4-60-14-18. 28 с.

⁴ Методические рекомендации по оценке ресурсной потребности пожарно-спасательных подразделений моногородов Российской Федерации с учетом их социально-экономического положения. М. : ВНИИПО, 2015. 20 с.

⁵ Методические рекомендации по формированию ресурсов пожарной охраны в сельских поселениях Российской Федерации в зависимости от величины рисков пожарной опасности : методические рекомендации. М. : ВНИИПО, 2019. 18 с.

⁶ Приказ МЧС России от 15 октября 2021 г. № 700 «Об утверждении методик расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны».

ния гарнизонов пожарной охраны, опубликованных за последние 10 лет, т.е. за период с 2013 по 2022 г.

Цель исследования — получение углубленного представления об актуальных отечественных подходах, методах и алгоритмах обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова.

Исходя из цели задачами исследования были определены:

- 1) выявление научных школ, занимающихся вопросами проектирования гарнизонов пожарной охраны и тенденций их развития;
- 2) определение основных методов решения задач определения оптимальных мест размещения и технической оснащенности пожарных подразделений;
- 3) формулирование перспективных направлений решения задач проектирования гарнизонов пожарной охраны.

Материалы и методы

В основу методики проведения исследования положен метод литературного обзора. Основным источником информации об опубликованных работах является научная электронная библиотека Elibrary.ru.

Полученные из Elibrary.ru источники в диапазоне дат 2013–2022 гг. были подвергнуты деконструкции с целью выявить следующие качественные характеристики публикаций:

- направленность работы;
- методы, использованные в исследовании;
- область применения результатов исследования.

Под *направленностью работ* в рамках исследования были установлены следующие категории, характеризующие цель рассматриваемых работ:

1. Постановка задачи.
2. Анализ исходных данных.
3. Разработка прикладных инструментов.
4. Применение для решения реальных задач.
5. Обзор публикаций и работ.
6. Распространение знаний и опыта.

Поскольку спектр научных методов, использованных в рассматриваемых работах, чрезвычайно обширен, для выявления закономерностей их применения была введена укрупненная классификация *использованных методов*, основанная на их общности, природе возникновения и частоте применения:

1. Имитационное моделирование.
2. Математическое моделирование (детерминированный подход).
3. Статистический анализ.
4. Анализ нормативных актов.
5. Прочие методы (методы, применение которых встречается реже 3 раз в разных работах).

Также в качестве *областей применения* результатов исследований были выбраны виды экстренных служб:

- 1) пожарные подразделения;
- 2) аварийно-спасательные формирования;
- 3) прочие подразделения и формирования.

Первый вид касается подразделений, для которых основной задачей является борьба с пожарами. Ко второму виду относятся формирования, выполняющие в первую очередь спасательные задачи, в том числе пожарно-спасательные подразделения, рассматриваемые в контексте выполнения ими первоочередных аварийно-спасательных работ за пределами основных задач пожарной охраны. Все прочие виды экстренных служб были отнесены к третьему виду, например добровольные пожарные формирования.

Полученные результаты деконструкции были дескриптивно сформированы в виде сетевой модели данных и далее подвергнуты анализу с использованием аксиоматического метода и логических заключений на основе анализа структуры полученного графа.

Деконструкция публикаций

База научной методологии расчета оптимальных пространственных параметров пожарных подразделений была заложена в работах Н.Н. Брушлинского, С.В. Соколова, в конце XX и начале XXI в. Она основывается на методах математического и имитационного моделирования, теории вероятности и системного анализа [2, 3]. Параллельно схожая задача решалась специалистами из ВНИИ ПО МЧС России А.В. Матюшиным, А.А. Порошиным и др. В 2005 г. выходят две схожих статьи, посвященные опыту нормирования ресурсов оперативных подразделений пожарной охраны и мест их дислокации в населенных пунктах — в России [9] и за рубежом [10].

Дальнейшие публикации будут рассмотрены в хронологическом порядке.

В статье [11] перечисляются основные недостатки, существовавшие на момент написания (2005 г.), методов расчетного обоснования мест размещения пожарных подразделений. Предлагается методология расчета количества пожарных подразделений, основанная на методах математического моделирования с учетом достижения одной из трех задач:

1. Площадь пожара на момент прибытия не превышает площади, которую можно потушить силами одного караула.
2. От момента возникновения пожара до момента его ликвидации не должен наступить предел огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций в помещении с очагом пожара.

3. За время от момента возникновения пожара и до момента его ликвидации опасные факторы пожара не должны достигнуть критических для жизни людей значений.

В работе отмечено, что введение в модель «возмущающих факторов», таких как некомплект личного состава, его плохая подготовка, отказ техники и т.д. могут помочь обосновать количество резервов сил и средств.

Статья [12] рассматривает решение задачи определения максимально допустимого расстояния от объекта пожара до места расположения пожарной части в рамках стохастического моделирования. Исходные параметры модели рассматривались как случайные величины.

В работе [13] показан способ оценки возможностей гарнизона противопожарной службы по обеспечению необходимого количества сил и средств в случае возникновения пожара на объекте с использованием КИС КОСМАС при проведении экспертизы объекта. Работа представляет интерес как практический пример использования методов имитационного моделирования применительно к решению задачи проведения экспертизы проекта здания.

В статье [14] анализируется проблема обоснования численности личного состава противопожарной службы и предлагаются конкретные пути и методы ее решения. Работа содержит краткую справку по истории вопроса, описание научной методологии его решения, сведения о численности противопожарных служб в некоторых странах мира по состоянию на начало XXI в., конкретный пример обоснования численности противопожарной службы (далее — ППС) для города и оценку требуемой численности личного состава ППС России, основанную на методах математического моделирования. Авторы выступают с критикой существующего «волевого» метода определения количества пожарных подразделений и численности личного состава. В качестве альтернативы предлагаются методы математического моделирования, позволяющие учитывать при расчетах реальные особенности отдельных территорий.

В статье [15] на основе статистических данных о пожарах рассматриваются вопросы нормирования времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара. Работа содержит анализ распределения жертв пожаров по основным причинам их гибели, статистические сведения о количестве погибших в различных странах мира, а также сведения о распределении количества пожаров по их последствиям в зависимости от времени прибытия первого подразделения за период 2006–2010 гг. Делается вывод о чрезмерных финансовых затратах, возникающих в результате принятия организационных решений по снижению времени прибытия

первого пожарного подразделения на одну минуту. В заключение авторы выступают с предложениями по совершенствованию нормирования времени прибытия первого пожарного подразделения. Например, предложено определить, что лишь 90 % всех выездов в городской местности должно укладываться во время 10 мин, при этом площадь обслуживания одним депо должна составлять 12–15 км².

В статьях [6, 16] представлены результаты разработки системы проектирования деятельности и ресурсной оснащенности оперативных подразделений пожарной охраны населенных пунктов (АСОП-ПО), проводившейся во ВНИИПО МЧС России во второй половине 2000-х гг., и в основу которых положены в том числе результаты, изложенные в [11, 12]. Содержатся основные сведения о ГИС и их применении в решении вопросов организационного проектирования гарнизонов пожарной охраны. Даны общие сведения об АСОП ПО и приводятся примеры ее использования. Согласно информации, приведенной в материале, платформой для разработки являлось программное обеспечение ESRI ArcGIS. Данный материал является одной из основных публикаций, освещающих разработку АСОП ПО.

В работе [17] описывается решение научно-технической проблемы обоснования и проектирования подсистемы инфраструктуры современных городов — комплекса экстренных и аварийно-спасательных служб. Работа обозначает актуальность проблемы, содержит описание основных этапов ее решения, аналитические модели процесса функционирования экстренных аварийно-спасательных служб (далее — ЭАСС) и сведения о способах их имитационного моделирования, общее описание КИС КОСМАС и ИС СТРАЭС и основных принципов их работы. Статья является одним из наиболее полных описаний принципов работы КИС КОСМАС, опубликованных в научных изданиях. Здесь упоминается о функционале КИС КОСМАС, позволяющем решать оптимизационные задачи по определению мест дислокации пожарных подразделений, больниц и т.д., распределению техники по пунктам дислокации.

В публикации [18] рассмотрены вопросы моделирования временных характеристик оперативной деятельности противопожарной службы с помощью распределения Эрланга. Показано, что все временные характеристики являются случайными непрерывными величинами, поэтому изучать их нужно вероятностно-статистическими методами. Выполнен статистический анализ показателей времени прибытия первого пожарного подразделения и времени локализации пожаров в Москве. Проанализированы нормативы по времени прибытия пожарных подразделений, изложенные в Федеральном законе¹. Приведены некоторые статистические сведения о парамет-

рах реагирования пожарных подразделений в России на 2012 г. Проведено их математическое моделирование с использованием распределения Эрланга. В заключении авторами озвучивается критика определенных в ФЗ-123¹ нормативов прибытия первого пожарного подразделения, аналогичная [15], и предложена своя формулировка нормативов времени прибытия пожарных подразделений к месту вызова для городов и сельской местности.

В докладе [19] сообщаются основные сведения о результатах работы по определению на научной основе требуемой численности ППС для защиты территории России от пожаров. Приведена постановка задачи и подходы к ее решению. В заключении сделаны выводы, что для защиты Российской Федерации от пожаров требуется 240–150 тыс. человек ППС и 670–700 тыс. добровольных пожарных.

В статье [20] описана математическая модель определения необходимого числа оперативных подразделений пожарной охраны для защиты населенных пунктов от пожаров. Представлены научно-методический подход к обоснованию необходимого числа пожарных подразделений населенных пунктов, учитывающий достижение 3 целей прибытия, и результаты разработки автоматизированной геоинформационной АСОП-ПО, предложенные в [18]. Описаны ее структура и функциональные возможности.

В обзорной статье [21] описана история разработки КИС КОСМАС и приведены основные причины появления компьютерных имитационных систем. Работа содержит историю создания имитационной системы КОСМАС, ее общее описание, возможности и пути адаптации для конкретных задач. Приводится опыт применения системы за 25 лет ее развития и использования. В заключении делается вывод о том, что «будущее за имитационными системами», в том числе за системой КОСМАС. Указывается, что для адаптации системы под районы выезда требуется от 6 до 7 месяцев работы.

В статье [22] представлены результаты многолетнего исследования по обоснованию и проектированию подсистемы экстренных и аварийно-спасательных служб по состоянию на 2016 г. Подчеркивается важность проблемы оргпроектирования экстренных аварийных служб города. Авторами сформулированы основные принципы и этапы ее решения, а также недостатки математического моделирования и необходимость применения имитационного моделирования для более глубокого исследования особенностей оргпроектирования экстренных аварийно-спасательных служб (далее — ЭАСС). В качестве примера использования данного подхода приводится КИС КОСМАС и ИС СТРЕС.

Авторами в работах [23, 24] представлены результаты исследования по определению характера движе-

ния пожарных автомобилей в транспортном потоке. В работах обозначена проблема оценки скорости движения пожарных автомобилей с учетом загруженности дорог и предложено ее решение на основе анализа записей характера GPS-трекеров, установленных на пожарных автомобилях. Отмечено увеличение скорости следования в зависимости от расстояния от пожарного депо до места вызова. Проведен сравнительный анализ скоростей следования для пожарных автомобилей различного типа, а также для любого времени суток и дней недели. В результате проведенного исследования были получены коэффициенты влияния различных факторов на скорость движения пожарных автомобилей к месту вызова, которые могут быть использованы при имитационном моделировании процесса реагирования на пожары.

В работах [25, 26], развивающих тему определения численности подразделений добровольной пожарной охраны, рассмотрено применение методов имитационного моделирования для оценки параметров оперативного реагирования добровольных пожарных команд. Особый интерес в публикациях представляет модель, учитывающая квалификации членов ДПО при проведении имитационных экспериментов. Описываемые результаты предлагается использовать при оценке времени прибытия личного состава ДПК к месту вызова и его распределения по территории населенного пункта в разные времена года, дни недели и время суток.

Статья [27] посвящена адаптации КИС КОСМАС к особенностям применения пожарных подразделений в Республике Вьетнам. Приводятся основные сведения о характере реагирования пожарных подразделений в Республике Вьетнам, описывается процесс адаптации КИС КОСМАС, приводятся сведения о проверке полученной модели на адекватность. В заключении предлагается использовать полученную модель и результаты имитационного моделирования для проведения дальнейших расчетов по определению требуемого количества и размещения пожарных депо во Вьетнаме.

В статье [28] на основе статистических данных по реагированию на пожары в Российской Федерации за 2007–2015 гг. демонстрируются основные тенденции изменения характера возникновения пожаров и реагирования на них подразделений пожарной охраны. Работа содержит краткий обзор обстановки с пожарами в Российской Федерации по состоянию на 2015 г., сведения об особенностях учета пожаров в СССР, США и современной России, а также анализ статистических показателей ущерба от одного пожара и наблюдения, связанные с динамикой изменения показателей среднего времени прибытия и тушения пожаров.

В работе [29] приводятся результаты анализа статистики времени прибытия пожарных подразделений в Санкт-Петербурге за период с 2006 по 2015 г. с использованием КИС КОСМАС. Представлены статистические сведения о времени прибытия, отмечено несоответствие распределений количества выездов по времени прибытия значениям, полученным с использованием распределения Эрланга пятого порядка, также отмечена тенденция увеличения скорости следования пожарных подразделений к месту вызова за период с 2006 по 2015 гг. Для оценки соответствия реальности представленных сведений проведено математическое и имитационное моделирование реальных показателей прибытия. С использованием КИС КОСМАС проведен анализ территориального распределения времени прибытия подразделений к местам вызова. В заключении авторами делается вывод, что «в современных условиях средняя скорость движения пожарных подразделений к местам вызовов в городе составляет 21–22 км/ч, при такой скорости среднее время прибытия первых пожарных подразделений к местам вызовов будет находиться в интервале 9,0–9,5 мин, при этом доля случаев с временем прибытия более 10 мин будет составлять 28–35 %» [29].

Авторы [30], располагая необходимым статистическим материалом, разделили проведение исследования на несколько этапов:

- анализ абсолютных значений параметров городов и их противопожарных служб (далее — ППС);
- исследование относительных характеристик этих параметров, вытекающих из предыдущего анализа;
- сравнительный анализ некоторых параметров организации ППС в городах при использовании расчетных методов. В заключении авторами делается вывод о наличии закономерностей организации противопожарных служб в разных странах и городах.

В публикации [31] рассмотрены вопросы разработки методов определения скорости следования дежурного караула пожарной охраны по дорогам населенного пункта на место пожара на примере города Ханой (Республика Вьетнам). В основу положен научно-методический подход к обоснованию числа пожарных подразделений, основанный на расчете максимально допустимого расстояния между защищаемым объектом и пожарным депо, исходя из различных целей выезда дежурного караула. Материал содержит описание методики расчета основных статистических показателей скоростей следования пожарных подразделений и сами эти исходные значения. В заключении авторы делают вывод, что с учетом неблагоприятных факторов (погодные усло-

вия, дорожный трафик и т.д.) скорость следования пожарных автомобилей в городе Ханой составляет 23 км/ч.

В статье [32] рассмотрены вопросы применения методологии обоснования необходимого числа оперативных подразделений пожарной охраны и мест их дислокации в населенных пунктах для анализа оперативно-тактических возможностей гарнизона пожарной охраны г. Ханой. Проведены расчеты и построены графики зависимости для оценки влияния оперативно-тактических параметров подразделений пожарной охраны на их необходимое число в населенном пункте. По результатам анализа сформулированы выводы о возможности достижения гарнизоном пожарной охраны тех или иных целей выезда подразделений пожарной охраны на пожар.

В докладе [33] затрагиваются вопросы определения требуемой численности основных пожарных автомобилей и личного состава. Рассмотрены статистические сведения о реагировании пожарных подразделений на пожары в Московской области. На основе математического моделирования характера реагирования пожарных подразделений предложена математическая модель обоснования ресурсной потребности пожарных подразделений.

В статье [34] приводится краткий анализ сложившихся к моменту публикации подходов к определению ресурсной потребности пожарной охраны поселений и городских округов. На основе анализа предложен порядок расчета численности и технической оснащенности пожарно-спасательных подразделений МЧС России.

В публикации [35] описываются основные подходы, использованные при разработке методических рекомендаций по формированию ресурсов пожарной охраны в сельских поселениях Российской Федерации в зависимости от величины рисков пожарной опасности⁵. Описаны основные статистические данные по тушению пожаров в сельских поселениях РФ в 2016, 2017 гг., проводится их факторный анализ, предложена классификация населенных пунктов для оценки ресурсов пожарной охраны в зависимости от численности населения.

Особый интерес представляет публикация [36], посвященная рассмотрению подходов к нормированию количества пожарных автомобилей, требуемых для защиты населенного пункта. В качестве классификационного подхода предлагается разделение общего массива методов на «жесткие» и «гибкие» подходы к нормированию. В первом случае количество пожарных депо и их оснащенность определяются на основе фиксированных норм, во втором — на основе проведенных расчетов. Перечисляются сильные и слабые стороны каждого из подходов. В заключении делается вывод, что «при разработке

нормативных документов в этой области следует ориентироваться в первую очередь на величины пожарных рисков, степень пожарной опасности объектов защиты на территории обслуживания пожарного депо, кроме того, необходимо учитывать перспективные документы развития территорий на основе региональных целевых программ» [36].

В статье [37] рассматривается модель определения мест размещения специализированных пожарно-спасательных частей (далее — СПСЧ). СПСЧ принимают участие не только в тушении обычных техногенных пожаров, но и в ликвидации последствий широкого спектра ЧС: взрывы, аварии, природные пожары, наводнения, землетрясения и т.д. В связи с этим размещение СПСЧ имеет ряд особенностей, требующих специфического подхода к решению задачи размещения, основанного на учете рисков возможных ЧС на территории субъектов РФ. В приведенном в статье примере расчета используются декартовы координаты. Однако сам подход в целом может быть использован и для расчета с использованием графа дорожной сети, с соответствующими изменениями в методе расчета.

В докладе [38] поднимается проблема отсутствия прямых норм и соответствующих схем расчета по определению мест размещения подразделений пожарной охраны для зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф1.2, Ф4.1, Ф4.2. Для ее решения предлагается подход, описанный в СП 11.13130.2009². Приведен пример расчета для объектов, расположенных на территории г. Балашиха. Более подробно вопросы определения оптимальных мест дислокации пожарных подразделений для защиты таких объектов описаны в [39]. В заключении статьи делается вывод, что «выполнение некоторых целей выезда дежурного караула на пожар для зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф1.2, Ф4.1, Ф4.2 проблематично при существующей, исторически сложившейся дислокации действующих подразделений пожарной охраны и предлагается применение организационных и технических мероприятий».

В материале [40] рассмотрены различные нормативные и расчетные подходы к обоснованию мест размещения вновь создаваемых пожарных подразделений. Внимание уделено ФЗ-123¹, СП 11.13130.2009², КИС КОСМАС и Методическим рекомендациям⁷. Проведен сравнительный анализ и перечислены положительные и отрицательные стороны каждого из подходов.

⁷ Методические рекомендации по действиям подразделений федеральной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ (направлен указ. МЧС России от 26.05.2010 № 43-2007-18).

В статье [41] на основе анализа особенностей мегаполисов в качестве наилучшего подхода к организационному проектированию гарнизонов пожарной охраны предлагается имитационное моделирование. Используя в качестве источников научные публикации в данной области, авторы предлагают принципы информационной поддержки системного проектирования развития сети пожарных депо на территории мегаполиса, а именно: фактологичность используемых данных, наличие количественных (желательно) и/или качественных оценок основных показателей, интерактивность (или возможность диалога) и законность (используемых данных, оценок, вариантов и т.п.). В заключении предлагается направление дальнейших исследований в виде синтеза системы имитационного моделирования, позволяющей редактировать пространственные данные о размещении пожарных депо, местах возникновения пожаров и оценивать результаты реагирования пожарных подразделений.

В публикациях [42, 43] описывается подход к расчету количества необходимых депо, основной и специализированной техники с использованием методов компьютерного имитационного моделирования с использованием ГИС. Приводятся сведения о параметрах реагирования пожарных подразделений в городе Санкт-Петербурге, на основе методов теории систем массового обслуживания и инструментов сервисов Яндекс.Карты и Яндекс.Навигатор разработана компьютерная имитационная модель, проведены расчеты требуемого количества отделений для защиты Санкт-Петербурга. В качестве опорных рассмотрены 4 основных варианта дорожной сети, размещения и оснащения пожарных депо. Несмотря на то что авторы называют свою систему системой имитационного моделирования, буквальное прочтение материала говорит о том, что речь идет скорее о компьютерной системе математического моделирования, так как в ходе расчетов не производится расчет текущего состояния оперативной обстановки и взаимного влияния параметров реагирования пожарной службы на вызовы. Недостатками реализации можно отметить использование таких данных, как расчет кратчайшего маршрута и времени следования пожарных подразделений с использованием удаленных сервисов, что снижает гибкость решения и делает систему зависимой от внешних источников данных.

В тезисах доклада [44] с целью совершенствования геоинформационных систем диспетчеризации пожарных подразделений за счет обеспечения их устойчивости разработана подобного рода системы с использованием трехступенчатой архитектуры, включающей: публичные картографические интернет-сервисы, специальное программное обеспечение на базе алгоритма Дейкстры и картосхемы, индивидуальной для

каждого подразделения МЧС, на которой нанесены кратчайшие маршруты следования, опасные и нежелательные для использования участки дороги, особенности городской среды (зоны многоэтажной застройки), светофоры.

Статья [45] представляет особый интерес как одна из немногих публикаций, посвященных применению методов машинного обучения в деятельности экстренных служб. В статье рассмотрен алгоритм *ResQ*. Алгоритм проводит анализ поступающих вызовов, анализирует и сравнивает их с информацией из социальных сетей, выявляя пострадавших и сопоставляя их потребности с возможностями спасательных подразделений; на основе полученных данных производит оптимальное распределение сил и средств (СиС) подразделений в динамично меняющейся ситуации, для чего строит кратчайшие пути до пострадавших, рассчитывая количество потерпевших, к которым уже направлена помощь, и ожидающих ее, формирует очереди спасения по приоритетам. Также упоминаются такие методы поиска как «случайное блуждание», «лучший — первый» и «поиск по правилам». В качестве литературных источников авторы используют преимущественно публикации зарубежных авторов.

В статье [46] рассматриваются вопросы, связанные с задачей определения рационального места размещения спасательных воинских формирований. Данная задача родственна задаче определения мест дислокации пожарных подразделений, однако имеет свои особенности, которые и отмечены в данной публикации. Подчеркивается важность учета не только равноудаленности объектов защиты от мест дислокации, но и их значимости с точки зрения рисков возникновения пожаров. Для определения значимости объектов предлагается использование метода экспертных оценок и дается его предварительная формулировка применительно для решаемой задачи. Методами решения частных задач предлагаются метод парных сравнений и метод сравнительных суждений Терстоуна.

В статье [47], являющейся продолжением [48], описывается постановка научной задачи определения рационального варианта дислокации спасательных воинских формирований МЧС России. На основе опыта проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации крупных ЧС делается вывод, что существующие подходы дислокации спасательных формирований имеют недостатки. Описываются отдельные возможные пути сокращения времени прибытия спасательных формирований к месту ЧС. Перечисляются некоторые характеристики потенциально опасных объектов, которые следует учитывать при определении дислокации спасательных подразделений.

К таковым автор относит: количество людей в зоне возможной ЧС, наличие материальных ценностей, наличие и количество пунктов управления, наличие критически важных объектов, площадь территории, которая может быть поражена в результате ЧС, и объем эвакуационных мероприятий, а также характер дорожной сети и уровень развития инфраструктуры. В заключении формулируется научная задача определения мест дислокации с учетом перечисленных факторов.

В материале [48] рассматривается задача определения ресурсной потребности пожарных подразделений в пожарной технике. В качестве метода оценки потребности предложен метод векторного анализа, подразумевающий представление всех параметров реагирования пожарно-спасательных подразделений на конкретный вид действий в виде вектора и последующий его анализ.

В статье [49] предложен подход к определению мест дислокации аварийно-спасательных подразделений МЧС России на основе анализа географических социально-экономических характеристик и особенностей субъектов Федерации. Предложены некоторые подходы к выбору математических моделей определения мест оптимального размещения АСФ.

Публикация [50], посвященная показателям для определения мест дислокации пожарно-спасательных частей. В работе приведен обзор подходов к определению мест дислокации пожарных подразделений в России и за рубежом. Предложены базовые показатели оценки размещения пожарных подразделений, к которым отнесены: радиус обслуживания, время прибытия и скорость движения пожарных автомобилей. В заключении отмечено, что перспективным направлением дальнейших работ представляется изучение опыта США по определению радиуса обслуживания пожарных подразделений в зависимости от плотности застройки и наличия высотных зданий.

Доклад [51] представляет интерес с точки зрения описания углубленного анализа параметров, учитываемых при проведении расчетов, связанных с определением областей нормативного времени прибытия пожарных подразделений и мест их дислокации. В заключении авторами делается вывод о возможности определения оптимальных мест дислокации пожарных подразделений, только совместив различные подходы.

Работа авторов [52] посвящена оценке степени прикрытия г. Воронежа пожарными подразделениями по состоянию на 2013 г. и динамике ее изменения с учетом роста города. Приводится подробный анализ обстановки с пожарами и факторов, оказывающих на них влияние; сравниваются реальные показатели с требованиями федерального законодательства.

В статье [53] описывается процесс разработки информационной системы расчета областей нормативного обслуживания пожарными подразделениями, основанной на Методических рекомендациях³. В материале предлагается подход на основе методов теории графов, реализованный в виде программных инструментов языка программирования С# и визуализации результатов расчетов с использованием современных ГИС-технологий. Полученные результаты были использованы ГУ МЧС России по Красноярскому краю для пересмотра границ районов выезда пожарных подразделений красноярского гарнизона.

В статье [54] обоснована необходимость определения оптимального количества аварийно-спасательных формирований и мест их дислокации на территории Республики Татарстан с учетом источников и факторов опасности, географических и социально-экономических условий зон ответственности. Представлены формулировка общей постановки задачи оптимального размещения аварийно-спасательных формирований и методы ее решения. В основу математического аппарата положена теория графов и ее адаптация для дорожной сети регионов. В качестве инструмента решения поставленной задачи рассматривается метод уступок, методически основанный на материалах статьи [55]. Как достоинство метода отмечен его циклический характер, связанный с тем, что на каждом этапе решается задача оптимизации соответствующих показателей, а также возможность применения различных математических методов оптимизации. Недостатком метода называется связь с субъективным характером определения уступок. Отдельный интерес в данной публикации представляет использование принципа Парето-оптимальности для определения требуемого количества аварийно-спасательных формирований.

В докладе [56] приводятся результаты исследования влияния географических и социально-экономических факторов субъекта РФ (на примере Республики Татарстан) на характер реагирования аварийно-спасательных формирований (АСФ) на ЧС. На основе исследования, проведенного с использованием методов математического моделирования, показано, что при определении оптимальных мест размещения АСФ следует учитывать такие факторы, как численность и плотность населения, протяженность автодорог, протяженность газопроводов, количество потенциально опасных объектов, озерность и количество мест выхода на лед.

Результаты и их обсуждение

Всего было рассмотрено 49 публикаций. Из них основную массу составляют научные статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях (38 ед.), также рассмотрены 9 публикаций в сборниках науч-

ных конференций. В связи с большим количеством ссылок в обзор были включены 2 книги [2, 3].

Изначально рассматривались только публикации, вышедшие в свет начиная с 2013 г., однако в ходе работы выяснилось, что существует ряд более ранних публикаций, без упоминания которых картина исследования может оказаться неполной. Поэтому из 49 публикаций 10 относятся к диапазону дат 2005–2012 гг. Общий граф публикаций представлен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, большая часть публикаций имеют ссылки друг на друга, что говорит о связанности методов для большей части работ. Вместе с тем граф имеет как изолированные вершины (1), так и два не связанных компонента (2 и 3). Изолированные вершины представляют публикации, описывающие применение нестандартных или нетиповых методов. Так, в [45] описывается применение методов машинного обучения, в [37] описывается применение методов многокритериальной оптимизации применительно к СПСЧ, а в [40] упор сделан на анализ нормативной базы. Несвязный компонент 2 отражает публикации [23, 24], относящиеся к вопросам экспериментального определения скоростей движения пожарных подразделений. Наиболее крупный несвязный компонент 3 отражает публикации, связанные с определением мест размещения аварийно-спасательных подразделений.

На рис. 2 представлены результаты анализа публикаций по направленности. Видно, что большая часть работ посвящена разработке прикладных инструментов и анализу исходных данных. Основопологающих работ, связанных с обзором имеющегося опыта и постановкой новых задач исследования, немного, что говорит о невысокой активности

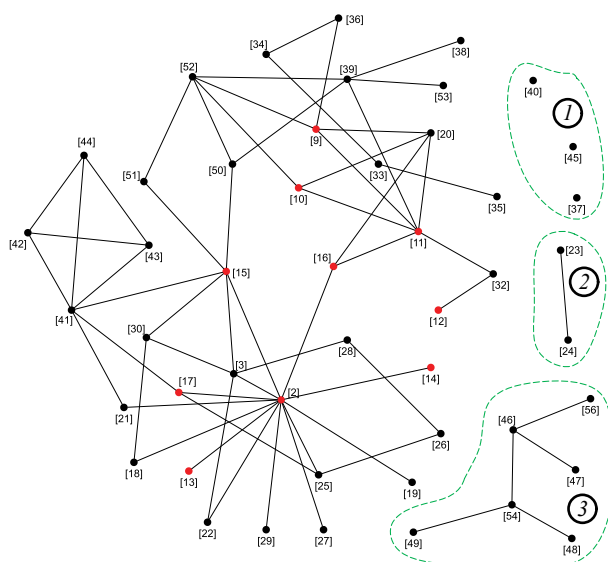


Рис. 1. Общий граф публикаций. Красные узлы — публикации, вышедшие до 2013 г., черные — после
Fig. 1. Publications graph. Red nodes — publications published before 2013, black — after

развития проблематики проектирования размещения пожарных подразделений. Анализ текстов публикаций подтверждает эту мысль — многие авторы сходятся во мнении, что имитационное моделирование является наилучшим способом решения данной задачи, а также что существующие решения позволяют в полной мере решить все задачи организационного проектирования гарнизонов.

Обращает на себя внимание и тот факт, что за последние 20 лет свет увидели всего 3 обзорные публикации, посвященные работам в области определения оптимального размещения пожарных подразделений [9, 10, 21]. Анализ областей применения рассмотренных работ (рис. 3) говорит о том, что наибольший интерес представляет организационное проектирование именно пожарных подразделений.

В данной работе рассматривались только ссылки между публикациями, участвовавшими в обзоре, поэтому в целом популярность той или иной работы по ней оценить нельзя. Кроме того, ряд публикаций, будучи написанными одними и теми же авторами, ссылаются на одни и те же, зачастую собственные, публикации. Исходя из количества ссылок, наибо-

лее знаковыми работами в рассматриваемой области являются [2, 9, 15]. Данные работы предлагается в дальнейшем рассматривать как основополагающие.

Следует заметить, что в настоящей статье не рассматривались ссылки на нормативные документы (ФЗ, ГОСТы и т.д.), своды правил и методические рекомендации, поскольку их влияние, как представляется, лежит за пределами объектной области исследования.

Распределение работ по организациям и применяемым методам
Publications distribution by institutes and methods

Метод Method	СПбГУ Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia	АППС Academy of State Fire Service of the Emercom of Russia	ВНИИПО VNIIPo of Emercom of Russia	Прочие Other	Итого по методам Total by method
Математическое моделирование (детерминированный подход) Mathematical modelling (deterministic approach)	2	6	8	4	20
Прочие методы Other methods	6	3	4	4	17
Статистический анализ Statistical analysis	0	9	0	3	12
Имитационное моделирование Computer simulation	3	7	1	0	11
Анализ нормативных актов Regulations analysis	2	0	2	1	5
Натурный эксперимент Experiments	0	2	0	0	2
Обзор публикаций и работ Works and publications review	0	0	2	0	2
Машинное обучение Machine learning	1	0	0	0	1
Итого Total	14	27	17	12	70

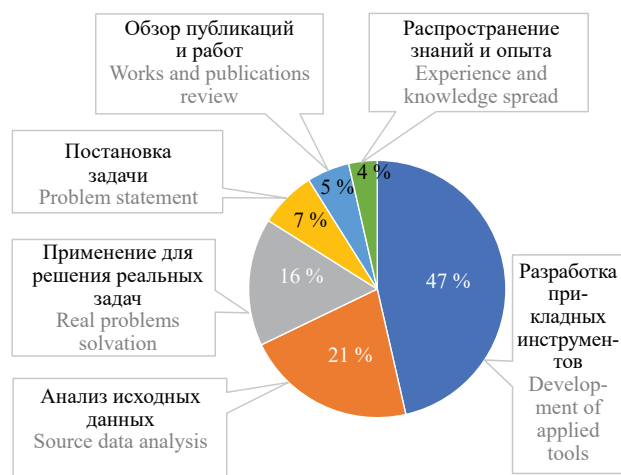


Рис. 2. Распределение работ по направленности
Fig. 2. Distribution of works by focus

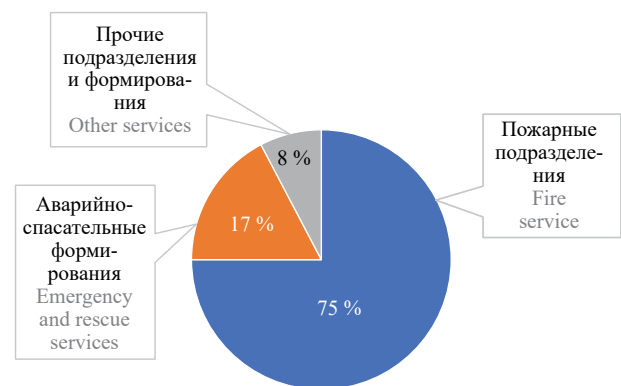


Рис. 3. Распределение работ по области применения
Fig. 3. Distribution of work by field of application

На основе собранных данных об использованных и упомянутых в публикациях научных методов была составлена таблица, отражающая количество публикаций, соотнесенных с научными коллективами и используемыми методами. В одной и той же публикации могут описываться несколько методов, поэтому общее количество упоминаний различных методов превышает количество рассмотренных публикаций.

Из таблицы видно, что наиболее популярными группами методов исследования задач поиска оптимальных мест размещения пожарных подразделений являются «Математическое моделирование (детерминированный подход)», «Статистический анализ» и «Имитационное моделирование».

Группа «Прочие методы» включает в себя методы, не вошедшие, в силу малого количества упоминаний, в прочие группы, поэтому при сравнении не рассматривается. Среди наиболее интересных методов, отнесенных к данной группе, стоит отметить применение экспертных методов, методов системного анализа и методов машинного обучения.

Группа методов математического моделирования (детерминированный подход) также включает большое количество частных методов, среди которых можно выделить методы многофакторной оптимизации, теории массового обслуживания и теории графов. Методы последней группы в том или ином виде используются в подавляющем большинстве работ.

Изучение публикаций позволило выделить следующие наиболее широко используемые группы исходных данных:

- граф дорожной сети;
- сведения о размещении территориальных подразделений и их оснащении;
- сведения о статистике реагирования подразделений;
- сведения об объектах, размещенных на территории населенного пункта;
- сведения о пожароопасных характеристиках веществ и материалов;
- данные открытых сервисов.

Проведенный анализ говорит о том, что в целом вопросам расчетного обоснования мест размещения подразделений экстренных служб в России уделяется значительное внимание. Вместе с тем прослеживается и тот факт, что за последние десять лет заметного прогресса в развитии таких методов не наблюдается. Остро стоит и вопрос применения существующих методов к решению масштабных расчетных задач. Несмотря на то что в ряде публикаций идет речь о проведении расчетов для достаточно крупных регионов [27], алгоритмическая сложность таких методов, как имитационное моделирование деятельности пожарной охраны, может

приводить к заметным временным затратам на проведение расчетов.

Отдельную сложность представляет задача подготовки исходных данных. В рассмотренных публикациях говорится, что большая часть исходных данных, требуемых для расчета, либо должна быть введена вручную, либо требует основательной обработки. Очевидно, что чем более высокую точность расчетов требуется получить, тем более значительным объемом исходных данных мы должны располагать. При этом едва ли представляется возможным учесть все многообразие факторов, оказывающих влияние на эффективность деятельности пожарных подразделений.

Одним из следствий описанных выше недостатков существующих решений является сложность в их применении за пределами научных коллективов. Ни в одной из рассмотренных публикаций не упоминается о применении разработанных решений в гарнизонах пожарной охраны, органах местной исполнительной власти или даже в центральном аппарате МЧС России, что наталкивает на мысль о сложностях, связанных с их распространением.

Анализ показал, что в настоящее время в России существует, как минимум, два наиболее широко используемых для расчета места дислокации подразделений и их технической оснащенности подходов: математическое моделирование и имитационное моделирование. Каждый из подходов имеет сильные и слабые стороны, которые делают их более или менее применимыми в тех или иных случаях. Вместе с тем не существует методов выбора подхода для решения конкретной задачи.

Общими недостатками для подавляющего большинства публикаций можно отметить слабое использование современных подходов к анализу и визуализации данных. Так, научные инструменты, созданные с использованием языков программирования Python и R, не упоминаются ни в одной из работ, несмотря на то, что де-факто именно эти инструменты на текущий момент являются стандартом научных вычислений во всем мире. Кроме того, в публикациях редко упоминаются методы пространственной аналитики из области геоинформационных систем. Наконец, практически никто из авторов не упоминает об использовании в работах открытых данных о дорожной сети, зданиях и сооружениях, свойствах объектов и материалов, демографических данных и т.д.

Выводы

В ходе проведения обзора были получены следующие результаты.

1. Наиболее развитыми и применяемыми методами решения задач определения оптимальных мест

размещения и технической оснащенности пожарных подразделений являются методы математического моделирования и имитационного моделирования с использованием компьютерных технологий.

2. В целом методы решения задач определения оптимальных мест размещения и технической оснащенности пожарных подразделений в настоящий момент развиваются на основе современных информационных технологий. Из числа отмеченных в публикации можно упомянуть методы машинного обучения и экспертные методы.

3. Основными факторами, учитываемыми при определении оптимальных мест размещения пожарных подразделений, являются: удаленность от пожарных подразделений с учетом кратчайшего маршрута следования, характер застройки, оснащенность и укомплектованность пожарных подразделений, оперативная обстановка в районе выезда, пожароопасные характеристики зданий и сооружений.

Онлайн-подшивка рассмотренных в статье публикаций расположена по адресу URL: https://www.zotero.org/groups/4991792/fire_units_dislocation/library

С целью дальнейшего развития методов расчетного обоснования количества, мест размещения и технической оснащенности пожарных подразделений предлагается:

1. Применение современных информационных технологий из области ГИС, аналитики данных и искусственного интеллекта, в том числе алгоритмов теории графов. Такие инструменты совершенствуют реализацию существующих расчетных методик в виде конечных программных решений и способствуют развитию новых методов.

2. Разработка подходов к использованию открытых данных, таких как дорожная сеть, здания и сооружения, экономические и демографические данные.

3. Создание единой научной терминологии, что способствовало бы унификации подходов в области расчетного обоснования мест дислокации пожарных подразделений.

4. Создание открытой научно-исследовательской программной платформы для разработки и тестирования различных подходов и методов расчетного обоснования мест дислокации пожарных подразделений.

5. Создание базы пожарно-технических пространственных данных зданий, сооружений, дорожной сети и т.д., которая могла бы использоваться как в повседневной деятельности пожарных подразделений, так и в проведении научных и инженерных расчетов при решении задач деятельности экстренных служб.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат сб. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
2. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Алехин Е.М., Коломиец Ю.И., Вагнер П. Безопасность городов. Имитационное моделирование городских процессов и систем. М. : ФАЗИС, 2004. 172 с.
3. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Математические методы и модели управления в противопожарной службе : учебник. 2-е изд. испр. и доп. М. : Академия МЧС России, 2019. 194 с.
4. Матюшин А.В. и др. Модель обоснования мест дислокации оперативных подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта // Мат. XX междунар. науч.-практ. конф. Секция 3. М. : ВНИИПО, 2007. С. 66–71.
5. Матюшин А.В., Порошин А.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Удавцова Е.Ю., Сергеев А.Э. и др. Определение областей нормативного обслуживания территории населенного пункта (района) оперативными подразделениями пожарной охраны // Пожарная безопасность. 2010. № 4. С. 104–110. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15318628>.
6. Порошин А.А. и др. Автоматизированная система организационного проектирования деятельности и ресурсной оснащенности оперативных подразделений пожарной охраны // Юбилейный сб. трудов ФГБУ ВНИИПО МЧС России /под общ. ред. В.И. Климкина. 2012. С. 523–542.
7. Матюшин А.В., Порошин А.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Матюшин Ю.А., Маштаков В.А. Оперативное реагирование и тушение пожаров в населенных пунктах Московской области // Пожарная безопасность. 2010. № 4. С. 91–103. EDN: MXFQXP.
8. Порошин А.А. Методология проектирования гарнизонов пожарной охраны : автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.26.03. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. 49 с.
9. Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А. Отечественный опыт нормирования ресурсов оперативных подразделений пожарной охраны и мест их дислокации в населенных пунктах // Пожарная безопасность. 2005. № 3. С. 75–80. EDN: KVOFAT.
10. Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А. Зарубежный опыт обоснования мест дислокации оперативных подразделений пожарной охраны // Пожарная безопасность. 2005. № 2. С. 74–82. EDN: KVOESR.
11. Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А. Методологические основы определения необходимого числа оперативных подразделений пожарной охраны для защиты городских и сельских поселений от пожаров (новый взгляд на старую проблему) // Пожарная безопасность. 2005. № 3. С. 45–52. EDN: KVOEZR.

12. Матюшин А.В., Порошин А.А., Кондашов А.А., Матюшин Ю.А. Определение максимально допустимого расстояния между пожарным депо и объектом предполагаемого пожара при стохастической постановке задачи // Пожарная безопасность. 2007. № 2. С. 103–121. EDN: JWNRRRL.
13. Брушлинский Н.Н., Глуховенко Ю.М., Коробко В.Б., Соколов С.В. Компьютерные технологии для экспертизы пожарной безопасности объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 4. С. 53–58. EDN: KNUATH.
14. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Морозов В.И. Проблема государственной важности (как обосновать численность противопожарной службы России?) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2009. Т. 18. № 6. С. 7–12. EDN: KUXUTR.
15. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 9. С. 42–48. EDN: OFXCVT.
16. Матюшин А.В., Порошин А.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Матюшин Ю.А., Терехов А.В. Современные геоинформационные технологии в проектировании гарнизонов пожарной охраны // Пожарная безопасность. 2012. № 3. С. 107–119. EDN: PHSLGR.
17. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Вагнер П., Коломиец Ю.И., Соколов С.В. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов // Вестник РАН. 2012. Т. 12. № 3. С. 27–34. EDN: TXIKGX.
18. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. О распределении Эрланга и некоторых его приложениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 6. С. 11–17. EDN: SNVTNF.
19. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Оргпроектирование противопожарной службы России // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Труды XXI Междунар. конф., Москва, 18 декабря 2013 г. / под ред. Н.И. Архиповой, В.В. Кульбы. М. : Российский государственный гуманитарный университет, 2013. С. 34–36. EDN: SWVMLZ.
20. Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А. Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформационных технологий // Bezpieczenstwo i Technika Pożarnicza. 2013. Т. 31. № 3. С. 81–86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9 EDN: SBOQIR.
21. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Алехин Е.М., Коломиец Ю.И., Вагнер П. Опыт применения компьютерных имитационных систем моделирования деятельности экстренных служб // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 8. С. 6–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.6-16 EDN: WYJWGL.
22. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Вагнер П., Коломиец Ю.И., Соколов С.В. Решение проблемы оргпроектирования экстренных и аварийно-спасательных служб в городах // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 3 (67). С. 192–199. EDN: YKVVJOV.
23. Соколов С.В., Сибиряков М.В. Определение преимущества движения пожарно-спасательных подразделений в транспортном потоке // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1 (71). С. 244–254. EDN: ZDRKFT.
24. Сибиряков М.В. Анализ геоинформационных данных о следовании пожарно-спасательных подразделений к местам экстренных вызовов // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 6 (70). С. 214–221. EDN: YTCZGD.
25. Соколов С.В., Портнов Д.А., Попков С.Ю. Имитационная модель процесса функционирования территориальных добровольных пожарных команд для оценки параметров оперативного реагирования // Технологии техносферной безопасности. 2018. № 6 (82). С. 22–31. DOI: 10.25257/TTS.2018.6.82.22-31 EDN: YOQRIL.
26. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Портнов Д.А. Организация территориальных подразделений добровольной пожарной охраны // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 39–44. DOI: 10.25257/FE.2018.2.39-44 EDN: XUONRJ.
27. Соколов С.В., Брушлинский Н.Н., Фам К.Х. Разработка и адаптация имитационной системы оперативной деятельности пожарных подразделений к условиям Вьетнама // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 2. С. 5–14. DOI: 10.25257/FE.2021.2.5-14 EDN: HHZERM.
28. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П. О некоторых закономерностях и особенностях российской пожарной статистики // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 6. С. 33–38. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.33-38 EDN: WWLUZJ.
29. Соколов С.В., Судаков Е.А. Анализ и оценка времени прибытия пожарных подразделений к местам вызовов в Санкт-Петербурге в 2006–2015 гг. // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 2 (66). С. 86–93. EDN: YGDJUR.

30. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П. Организация пожарно-спасательных служб в городах мира // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 1. С. 49–55. DOI: 10.25257/FE.2017.1.49-55 EDN: ZFKDUL.
31. Матюшин А.В., Нго К.Т. Определение скорости следования дежурного караула пожарной охраны на место пожара в г. Ханое Республики Вьетнам // Пожарная безопасность. 2015. № 2. С. 44–48. EDN: UAAQCL.
32. Матюшин А.В., Матюшин Ю.А., Нго К.Т. Анализ оперативно-тактических возможностей гарнизона пожарной охраны Г. Ханоя (Республика Вьетнам) // Пожарная безопасность. 2016. № 1. С. 89–96. EDN: VOKTWN.
33. Порошин А.А., Харин В.В., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Кондашов А.А. Разработка методики оценки ресурсной потребности пожарно-спасательных подразделений моногородов Российской Федерации // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Ногинск, 19–20 мая 2016 г. Часть 1. Ногинск : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2016. С. 44–57. EDN: YGQDTV.
34. Порошин А.А., Харин В.В., Бобринев Е.В., Еремина В.В., Удавцова Е.Ю. Вопросы расчета ресурсной потребности пожарной охраны поселений и городских округов // Пожарная безопасность. 2018. № 4. С. 93–96. EDN: YRAFHF.
35. Порошин А.А., Харин В.В., Кондашов А.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю. Разработка методики обоснования ресурсов пожарной охраны в сельских поселениях Российской Федерации в зависимости от уровня пожарной опасности // Пожарная безопасность. 2018. № 4. С. 32–38. EDN: AZJZBL.
36. Порошин А.А., Харин В.В., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Кондашов А.А. Вопросы нормирования ресурсной потребности пожарной охраны // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1 (5). С. 507–512. EDN: SIEOQZ.
37. Харин В.В., Кондашов А.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Рюмина С.И. Технологии математического моделирования для определения оптимальных мест дислокации специализированных пожарно-спасательных частей // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 21 октября 2022 г. Красноярск : ФГБОУ высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. С. 12–18. EDN: FXHTPE.
38. Порошин А.А. Определение мест дислокации пожарных частей для защиты от пожаров зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф1.2, Ф4.1, Ф4.2.н // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. Междунар. XXXIV науч.-практ. конф., посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, 23–24 августа 2022 года. Москва : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 20–25. EDN: EIZBTM.
39. Порошин А.А. Определение мест дислокации подразделений пожарной охраны для защиты от пожаров социально значимых объектов // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 4 (98). С. 68–78. DOI: 10.25257/TTS.2022.4.98.68-78 EDN: RONVJC.
40. Таранцев А.А. О проблеме размещения вновь создаваемых пожарных частей на территориях регионов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 5. С. 52–57. EDN: QIYYVB.
41. Буйневич М.В., Максимов А.В., Пелех М.Т. Принципы информационной поддержки системного проектирования развития сети пожарных депо на территории мегаполиса // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2017. № 3. С. 129–135. EDN: ZRPAMZ.
42. Буйневич М.В., Пелех М.Т., Ахунова Д.Г. Развитие пожарной охраны мегаполиса с использованием технологии имитационного моделирования // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2019. № 3. С. 150–156. EDN: QPSJFU.
43. Буйневич М.В., Пелех М.Т. Проектирование пожарных депо с применением поисково-информационных картографических сервисов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сб. науч. статей по итогам VI междунар. науч. конф., Казань, 31 июля 2019 г. Часть 1. Казань : Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2019. С. 139–141. EDN: LTZAFB.
44. Буйневич М.В., Пелех М.Т. Совершенствование маршрутов следования пожарно-спасательных подразделений к месту вызова // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования,

- проблемы внедрения в производство : сб. науч. статей по итогам VII междунар. науч. конф., Казань, 31 августа 2019 г. Казань : Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2019. С. 86–88. EDN: JDBXAW.
45. Буйневич М.В., Вострых А.В. Адаптация алгоритма RESQ под задачи оптимального управления ресурсами организационных систем экстренных служб // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 3. С. 17–26. EDN: BFVHYC.
 46. Барышев П.Ф. Методический подход к определению рациональных вариантов дислокации спасательных воинских формирований МЧС России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 2 (25). С. 3–7. EDN: UCEBMZ.
 47. Барышев П.Ф. Постановка общей научной задачи определения рационального варианта дислокации спасательного воинского формирования МЧС России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 3 (26). С. 3–7. EDN: ULNQOP.
 48. Мартинович Н.В., Татаркин И.Н., Антонов А.В., Мельник А.А. Методика определения потребности пожарно-спасательных подразделений в пожарной технике, оборудовании и пожарно-техническом вооружении // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 6 (31). С. 120. DOI: 10.15862/85TVN615 EDN: VOBHID.
 49. Матюшев П.А., Афанасьев В.М. Исследование вопроса оптимального размещения аварийно-спасательных формирований на территории субъекта Российской Федерации с учетом его географических, природных, социально-экономических характеристик // Вестник НЦБЖД. 2018. № 4 (38). С. 98–102. EDN: YPMEXJ.
 50. Костямин Д.И., Добрякова Е.И. Базовые показатели для определения мест дислокации пожарно-спасательных частей // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2019. № 1 (56). С. 17–24. EDN: YWXKCL.
 51. Лучин М.Н., Фролов П.А. Анализ методик проведения расчетов нормативного времени прибытия и мест дислокации подразделений пожарной охраны // Мат. Междунар. науч.-технич. конф. «Системы безопасности». 2019. № 28. С. 399–405. EDN: VKXDZO.
 52. Лобода А.В., Муконина И.А. Анализ расположения подразделений пожарной охраны в городах (на примере г. Воронежа) // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2013. № 4 (9). С. 29–34. EDN: ROEXCJ.
 53. Мельник А.А., Антонов А.В., Мартинович Н.В., Малютин О.С. Расчетное определение области нормативного обслуживания пожарных частей на территории города Красноярск // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 3 (14). С. 61–66. EDN: TWSUTH.
 54. Матюшев П.А., Кузнецова М.А., Заринова С.Н. Общая постановка задачи определения мест дислокации аварийно-спасательных формирований // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2021. № 3 (50). С. 68–76. EDN: KGFRJK.
 55. Заозерская Л.А., Китриной Е., Колоколов А.А. Задача оптимального размещения центров телекоммуникаций в регионе // Математическое программирование : Труды XIII Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения». Иркутск, ИСЭМ СО РАН, 2005. № 1. С. 469–475.
 56. Матюшев П.А., Кузнецова М.А. Исследование влияния факторов на количество чрезвычайных ситуаций и происшествий на территории Республики Татарстан // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Междунар. молодежная науч. конф., посвящ. 60-летию со дня осуществления первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 г. Том IV. Казань : Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. С. 8–16. EDN: AJZYPK.

REFERENCES

1. *Fire and fire safety in 2021 : statistical collection*. 2021; 114. (rus).
2. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Alekhin Ye.M., Kolomiets Yu.I., Wagner P. *Security of cities. Simulation modeling of urban processes and systems*. 2004; 172. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68 (rus).
3. Brushlinskiy N.N. *Mathematical methods and management models in the fire service*. Moscow, State Fire Service Academy EMERCOM of Russia, 2019; 194 (rus).
4. Matyushin A.V. et al. *The model of justification of the locations of operational fire protection units on the territory of the settlement : conference paper*. Moscow, FGBU VNIPO Emercom of Russia, 2007; 66-71. (rus).
5. Matjushin A.V., Poroshin A.A., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Udavcova E.Ju., Sergeev A.Je. et al. Determination of the areas of normative maintenance of the territory of a locality (district) by operational units of fire protection. *Fire safety*. 2020; 4:104-110 (rus).
6. Poroshin A.A. Automated system of organizational design of activity and resource equipment of operational units of fire protection. *FGBU VNIPO Emercom of Russia*. 2012; 523-542. (rus).
7. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Bobrinev Ye.V. Kondashov A.A., Matjushin Ju.A., Mashtakov V.A. Rapid response and fire extinguishing in the settlements of the Moscow region. *Fire safety*. 2010; 4:91-103. EDN: MXFQXP. (rus).

8. Poroshin A.A. *Methodology of designing fire protection garrisons : phd thesis*. Moscow, FGBU VNIPO Emercom of Russia, 2009; 49. (rus).
9. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Yu.A. Domestic experience in rationing the resources of operational fire protection units and their locations in populated areas. *Fire safety*. 2005; 3:75-80. EDN: KVOFAT. (rus).
10. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Yu.A. Foreign experience in substantiating the locations of operational fire protection units. *Fire safety*. 2005; 2:74-82. EDN: KVOESR. (rus).
11. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Yu.A. Methodological foundations for determining the necessary number of operational fire protection units to protect urban and rural settlements from fires (a new look at the old problem). *Fire safety*. 2005; 3:45-52. EDN: KVOEZR. (rus).
12. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Kondashov A.A., Matyushin Yu.A. Determination of the maximum allowable distance between the fire station and the object of the proposed fire in the stochastic formulation of the problem. *Fire safety*. 2007; 2:103-121. EDN: JWNRRLL. (rus).
13. Brushlinskiy N.N., Glukhovenko Yu.M., Korobko V.B., Sokolov S.V. Computer technologies for the examination of fire safety facilities. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 4(17):53-58. EDN: KNUATH. (rus).
14. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Morozov V.I. A problem of national importance (how to justify the number of the fire service of Russia?). *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 6(18):7-12. EDN: KUXUTR. (rus).
15. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. On rationing the time of arrival of fire departments to the place of fire. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 9(20):42-48. EDN: OFXCVT. (rus).
16. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Bobrinev Ye.V., Kondashov A.A., Matyushin Ju.A., Terehov A.V. Modern geoinformation technologies in the design of fire protection garrisons. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 3:107-119. EDN: PHSLGR. (rus).
17. Alekhin Ye.M., Brushlinskiy N.N., Vagner P., Kolomiec Ju.I., Sokolov S.V. Problem-oriented simulation systems for computer-aided design and strategic management of emergency and emergency rescue services of cities. *Vestnik RAEN/Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2012; 3(12):27-34. EDN: TXIKGX. (rus).
18. Alekhin Ye.M., Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. On the Erlang distribution and some of its applications. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 6(23):11-17. EDN: SNVTNF. (rus).
19. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. Organizational design of the Fire Service of Russia. *XXI International conference*. Moscow, 2013; 34-36. EDN: SWVMLZ. (rus).
20. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Yu.A., Bobrinev E.V., Kondashov A.A. Designing the placement of fire protection units in settlements using geoinformation technologies. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2013; 3(31):81-86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9 EDN: SBOQIR. (rus).
21. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Alekhin Ye.M., Kolomiec Ju.I., Vagner P. Experience in the use of computer simulation systems for modeling the activities of emergency services. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 8(25):6-16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.6-16 EDN: WYJWGL. (rus).
22. Alekhin Ye.M., Brushlinskiy N.N., Vagner P., Kolomiec Ju.I., Sokolov S.V. Solving the problem of organizing the design of emergency and emergency rescue services in cities. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 3(67):192-199. EDN: YKVJOV. (rus).
23. Sokolov S.V., Sibiryakov M.V. Determining the advantages of the movement of fire and rescue units in the traffic flow. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71):244-254. EDN: ZDRKFT. (rus).
24. Sibiryakov M.V. Analysis of geoinformation data on the following of fire and rescue units to the places of emergency calls. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 6(70):214-221. EDN: YTCZGD. (rus).
25. Sokolov S.V., Portnov D.A., Popkov S.Yu. Simulation model of the process of functioning of territorial voluntary fire brigades to assess the parameters of rapid response. *Technology of Technosphere Safety*. 2018; 6(82):22-31. DOI: 10.25257/TTS.2018.6.82.22-31 EDN: YOQRIL. (rus).
26. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Portnov D.A. Organization of territorial units of voluntary fire protection. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2018; 2:39-44. DOI: 10.25257/FE.2018.2.39-44 EDN: XUONRJ. (rus).
27. Sokolov S.V., Brushlinskiy N.N., Fam K.Kh. Development and adaptation of the simulation system of operational activities of fire departments to the conditions of Vietnam. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 2:5-14. DOI: 10.25257/FE.2021.2.5-14 EDN: HHZEPM. (rus).
28. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Grigoryeva M.P. About some patterns and features of Russian fire statistics. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 6(25):33-38. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.33-38 EDN: WWLUZJ. (rus).
29. Sokolov S.V., Sudakov Ye.A. Analysis and evaluation of the arrival time of fire departments to the call sites in St. Petersburg in 2006-2015. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 2(66):86-93. EDN: YGDJUR. (rus).
30. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Grigoryeva M.P. Organization of fire and rescue services in the cities of the world. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2017; 1:49-55. DOI: 10.25257/FE.2017.1.49-55 EDN: ZFKDUL. (rus).

31. Matyushin A.V., Ngo K.T. Determination of the speed of the fire guard on duty to the place of fire in Hanoi, Republic of Vietnam. *Fire safety*. 2015; 2:44-48. EDN: UAAQCL. (rus).
32. Matyushin A.V., Matyushin Yu.A., Ngo K.T. Analysis of operational and tactical capabilities of the Hanoi Fire Protection Garrison (Republic of Vietnam). *Fire safety*. 2016; 1:89-96 EDN: VOKTWN. (rus).
33. Poroshin A.A., Kharin V.V., Bobrinev Ye.V., Udavcova E.Ju., Kondashov A.A. Development of a methodology for assessing the resource needs of fire and rescue units of single-industry towns of the Russian Federation. *Actual problems of fire safety. Conference paper 19-20 May 2016*. Noginsk, FGBU VNIPO Emercom of Russia. 2016; 44-47. EDN: YGQDTV. (rus).
34. Poroshin A.A., Kharin V.V., Bobrinev Ye.V., Eremina V.V., Udavcova E.Ju. Issues of calculating the resource needs of fire protection of settlements and urban districts. *Fire safety*. 2018; 4:93-96. EDN: YRAFHF. (rus).
35. Poroshin A.A., Kharin V.V., Kondashov A.A., Bobrinev E.V., Udavcova E.Ju. Development of a methodology for substantiating fire protection resources in rural settlements of the Russian Federation depending on the level of fire danger. *Fire safety*. 2018; 4:32-38. EDN: AZJZBL. (rus).
36. Poroshin A.A., Kharin V.V., Bobrinev Ye.V., Udavcova E.Ju., Kondashov A.A. Issues of rationing the resource needs of fire protection. *Fire and technospheric safety: problems and ways of improvement*. 2020; 1(5):507-512. EDN: SIEOQZ. (rus).
37. Kharin V.V., Kondashov A.A., Bobrinev Ye.V., Udavcova E.Ju., Rjumina S.I. Mathematical modeling technologies for determining the optimal locations of specialized fire and rescue units : conference paper. *International conference "Monitoring, modeling and forecasting of natural hazards and emergencies"*. Krasnoyarsk, 2022; 21-18. EDN: FXHTPE. (rus).
38. Poroshin A.A. Determination of the locations of fire brigades for fire protection of buildings of functional fire hazard classes F1.1, F1.2, F4.1, F4.2 : conference paper. *Actual fire safety problems: XXXIV science-practical conference. Balshiha, 23-24 August 2022*. Moscow, FGBU VNIPO Emercom of Russia, 2022; 20-25. EDN: EIZBTM. (rus).
39. Poroshin A.A. Determination of the locations of fire protection units to protect socially significant objects from fires. *Technology of Technosphere Safety*. 2022; 4(98):68-78. DOI: 10.25257/TTS.2022.4.98.68-78 EDN: ROHVJC. (rus).
40. Tarantsev A.A. About the problem of placement of newly created fire departments in the territories of the regions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 5(22):52-57. EDN: QIYYVB. (rus).
41. Buynevich M.V., Maksimov A.V., Pelekh M.T. Principles of information support for the system design of the development of a network of fire depots in the territory of the metropolis. *Bulletin of the St. Petersburg university of the state fire service of the ministry of emergency situations of Russia*. 2017; 3:129-135. EDN: ZRPAMZ. (rus).
42. Buynevich M.V., Pelekh M.T., Akhunova D.G. Development of fire protection of the megalopolis using simulation technology. *Bulletin of the St. Petersburg university of the state fire service of the ministry of emergency situations of Russia*. 2019; 3:150-156. EDN: QPSJFU. (rus).
43. Buynevich M.V. Advanced innovative developments. *Prospects and experience of use, problems of introduction into production : collection of scientific articles on the results of the sixth international scientific conference*. Kazan, 2019; 139-141. EDN: LTZAFB. (rus).
44. Buynevich M.V., Pelekh M.T. Improving the routes of fire and rescue units to the place of the call : conference paper. *Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of introduction into production : collection of scientific articles on the results of the sixth international scientific conference*. Kazan, 2019; 86-88. EDN: JDBXAW. (rus).
45. Buynevich M.V., Vostrykh A.V. Adaptation of the RSA algorithm to the tasks of optimal resource management of organizational systems of emergency services. *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2022; 3:17-26. EDN: BFVHYC. (rus).
46. Baryshev P.F. Methodical approach to the definition of rational options for the deployment of rescue military formations of the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Scientific and educational problems of civil protection*. 2015; 2(25):3-7. EDN: UCEBMZ. (rus).
47. Baryshev P.F. Statement of the general scientific task of determining the rational variant of the deployment of the rescue military formation of the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Scientific and educational problems of civil protection*. 2015; 3(26):3-7. EDN: ULNQOP. (rus).
48. Martinovich N.V., Tatarkin I.N., Antonov A.V., Melnik A.A. Methodology for determining the needs of fire and rescue units in fire equipment, equipment and fire-technical equipment. *Internet-journal Naukovedeniye*. 2015; 6(31):120. DOI: 10.15862/85TVN615 EDN: VOBHID. (rus).
49. Matyushev P.A., Afanasyev V.M. Investigation of the issue of optimal placement of emergency rescue units on the territory of the subject of the Russian Federation, taking into account its geographical, natural, socio-economic characteristics. *Vestnik NCBJhD*. 2018; 4(38):98-102. EDN: YPMEXJ. (rus).
50. Kostyamin D.I., Dobryakova Ye.I. Basic indicators for determining the locations of fire and rescue units. *Scientific Bulletin of the NII "Respirator"*. 2019; 1(56):17-24. EDN: YWXKCL. (rus).

51. Luchin M.N., Frolov P.A. Analysis of methods for calculating the standard arrival time and locations of fire protection units : conference paper. *International science-technical conference "Safety systems"*. 2019; 28:399-405. EDN: VKXDZO. (rus).
52. Loboda A.V., Mukonina I.A. Analysis of the location of fire protection units in cities (using the example of Voronezh). *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2013; 4(9):29-34. EDN: ROEXCJ. (rus).
53. Melnik A.A., Antonov A.V., Martinovich N.V., Malyutin O.S. Estimated definition of the area of normative maintenance of fire departments in the territory of the city of Krasnoyarsk. *Siberian fire-rescue bulletin*. 2019; 3(14):61-66. EDN: TWSUTH. (rus).
54. Matyushev P.A., Kuznetsova M.A., Zaripova S.N. General statement of the problem of determining the locations of emergency rescue units. *Scientific and educational problems of civil protection*. 2021; 3(50):68-76. EDN: KGFRJK. (rus).
55. Zaozerskaya L.A., Kitrinou Ye., Kolokolov A.A. The task of optimal placement of telecommunications centers in the region. *Mathematical programming Proceedings of the XIII Baikal International School–Seminar "Optimization methods and their applications"*. Irkutsk, ISAM SO RAN, 2005; 1:469-475. (rus).
56. Matyushev P.A., Kuznetsova M.A. Study of the influence of factors on the number of emergencies and incidents in the Republic of Tatarstan. *XXV Tupolev Readings (School of Young Scientists) : International Youth Scientific Conference dedicated to the 60th anniversary of the First Human Flight into Outer Space and the 90th anniversary of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev*. Kazan, 2021; 8-16. EDN: AJZYPK. (rus).

Поступила 04.08.2023, после доработки 14.09.2023;

принята к публикации 25.09.2023

Received August 4, 2023; Received in revised form September 14, 2023;

Accepted September 25, 2023

Информация об авторах

МАЛЮТИН Олег Сергеевич, заместитель начальника отдела информационных технологий и компьютерного моделирования научно-технического центра, 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. Железногорск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0001-5543-1324; e-mail: malyutin@sibpsa.ru

ХАБИБУЛИН Ренат Шамильевич, канд. техн. наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Вклад авторов:

Малютин О.С. — проведение исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Хабидулин Р.Ш. — научное руководство; концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Oleg S. MALYUTIN, Deputy of Informational Technologies and Computer Modelling Unit, Science-Technical Center, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5543-1324; e-mail: malyutin@sibpsa.ru

Renat Sh. KHABIBULIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, 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; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Contribution of the authors:

Oleg S. Malyutin — conducting research; writing the main text; writing the draft; final conclusions.

Renat Sh. Khabibulin — scientific management; research concept.

The authors declare no conflicts of interests.

Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники

Алексей Николаевич Григорьев, Виктор Борисович Захаревский,
Дмитрий Сергеевич Евтеев, Сергей Николаевич Аникин ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное развитие экономики и технологий приводит к увеличению числа подземных сооружений, что поднимает вопросы организации тушения пожаров в них в случае необходимости. Статистические данные показывают, что время тушения в подземных сооружениях значительно превышает среднее для других пожаров, при этом пожары в коллекторах представляют собой пожары повышенной сложности частного характера. В опубликованных работах, посвященных пожарам в подземных сооружениях, вопрос тушения пожаров в коллекторах при помощи специальной техники газового тушения не изучен.

Цель. Совершенствование методов тушения пожаров в подземных коллекторах для инженерных коммуникаций путем применения углекислого газа.

Задачи. Анализ оперативных действий пожарных подразделений при тушении пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций и опасных факторов, сопутствующих тушению пожаров в них; аналитическое обоснование возможности тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения на примере автомобиля газового тушения АГТ-1; формализация значений секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа в виде номограмм в сопряжении с объемом помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1.

Аналитическая часть. Алгоритм оптимизации выбора численности сил и средств, а также количества огнетушащих веществ для тушения пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций основан на аналитическом расчете оснащенности пожарных подразделений, геометрических параметров коллекторов и условий, обеспечивающих герметичность помещения.

Выводы. Проведена оценка использования автомобиля газового тушения АГТ-1 в подземных коллекторах до 1000 м³. На основе аналитических расчетов представлены формализованные данные и номограммы для расчета параметров тушения подземных коллекторов, разработан алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества. Доказана эффективность применения автомобиля газового тушения для ликвидации пожаров в кабельных линиях под напряжением и после его снятия.

Ключевые слова: подземный коллектор; горение кабеля; автомобиль газового тушения; коэффициент герметичности; кабельные коммуникации

Для цитирования: Григорьев А.Н., Захаревский В.Б., Евтеев Д.С., Аникин С.Н. Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 78–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.78-86

✉ Аникин Сергей Николаевич, e-mail: neytrinos@mail.ru

Substantiation of the possibility of carbon dioxide fire extinguishing of utility collectors using mobile fire-fighting equipment

Alexey N. Grigoriev, Viktor B. Zakharevskiy, Dmitriy S. Evteev, Sergey N. Anikin ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern development of economy and technology leads to an increase in the number of underground structures, which raises the issues of fire extinguishing organization in them in case of necessity. Statistical data show that the extinguishing time in underground structures is much longer than the average for other fires, while fires in collectors are fires of increased complexity of private nature.

In the published works devoted to fires in underground structures, the issue of extinguishing fires in collectors using special gas extinguishing equipment is not studied.

Purpose. Improvement of methods of fire extinguishing in underground collectors for engineering communications by using of carbon dioxide.

Tasks. Analysis of operational actions of fire departments when extinguishing fires in collectors for engineering communications and analysis of dangerous factors accompanying fire extinguishing in them; analytical substantiation of the possibility of extinguishing carbon dioxide in collectors for engineering communications by mobile fire extinguishing means, using the example of a gas extinguishing vehicle AGT-1; formalization of values of the second consumption of a fire barrel when carbon dioxide is supplied in the form of nomograms in conjunction with the volume of the room, which can be extinguished by the gas extinguishing vehicle AGT-1.

The analytical part. The algorithm of optimization of the choice of the number of forces and means, as well as the quantity of fire extinguishing agents for extinguishing fires in collectors for engineering communications is based on an analytical calculation of the equipment of fire departments, geometric parameters of collectors and conditions ensuring the tightness of the room.

Conclusions. The article evaluates the use of gas extinguishing vehicle (AGT-1) in underground collectors up to 1000 m³. On the basis of analytical calculations, the formalized data and nomograms for calculation of parameters of extinguishing underground collectors are presented, the algorithm of a choice of extinguishing substances and their quantity is developed. The efficiency of application of gas extinguishing vehicle for liquidation of fires in cable lines under voltage and after its removal is proven.

Keywords: underground collector; cable burning; gas extinguishing vehicle; tightness coefficient; cable communications

For citation: Grigoriev A.N., Zakharevskiy V.B., Evteev D.S., Anikin S.N. Substantiation of the possibility of carbon dioxide fire extinguishing of utility collectors using mobile fire-fighting equipment. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):78-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.78-86 (rus).

✉ Sergey Nikolaevich Anikin, e-mail: neytrinos@mail.ru

Введение

Современное развитие экономики и постоянное совершенствование производства, активное внедрение передовых технологий стимулируют увеличение числа подземных сооружений разнообразного назначения. Под подземными сооружениями понимаются сооружения, находящиеся ниже поверхности земли и служащие для различных целей. Вопросы безопасности при их эксплуатации являются приоритетными. В зарубежных странах также уделяется серьезное внимание данной проблеме [1–4], в частности рассматриваются вопросы тушения подземных сооружений инертным газом [5], в том числе при наличии силовых агрегатов и кабелей, повышающих риски возникновения пожара [6].

В процессе строительства, реконструкции, эксплуатации, ликвидации или консервации таких объектов могут возникать сложные задачи, связанные с аварийно-спасательными работами, и их решение, как правило, лежит в компетенции военнизированных горноспасательных частей. Однако в случае тушения пожаров в подземных сооружениях, таких как метрополитены, подземные парковки, коллекторы или кабельные каналы; при возникновении пожаров на промышленных предприятиях, включая тоннели, коллаидеры и убежища, ответственность за проведение подобных операций возлагается на Государственную про-

тивопожарную службу МЧС России или другие пожарные службы, предусмотренные законодательством.

Проведенный анализ эффективности оперативных действий при тушении пожаров в подземных сооружениях демонстрирует, что время, затрачиваемое на локализацию и полное устранение пожара в таких местах, заметно превышает средний показатель времени, затрачиваемого на тушение других типов пожара, который в 2020 г. составил 15,72 мин [7]. Анализ данных из статистических сборников «Пожары и пожарная безопасность» ВНИИПО за 2015–2019 гг. [8–12] показывает, что среднее по стране время прибытия первого пожарного подразделения к месту вызова имеет тенденции к увеличению (с 2015 по 2020 г. увеличилось на 11,4 %). В ходе изучения открытых научных и литературных источников за последние 10 лет выявлено, что публикаций по данной тематике практически нет. При этом тушение пожаров в подземных инженерных коммуникациях имеет ряд особенностей, касающихся как организации тушения пожара, так и способов, приемов и методов тушения.

Цель исследования заключается в повышении эффективности управления пожарными подразделениями на пожаре с применением в качестве огнетушащего вещества углекислого газа в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными

средствами пожаротушения на примере автомобиля газового тушения АГТ-1 посредством разработки нового алгоритма поддержки управленческого решения.

Для этого поставлены и решены следующие задачи:

- проанализированы (по описаниям пожаров) оперативные действия пожарных подразделений при тушении пожаров в коллекторах;
- перечислены сложности, с которыми сталкивается личный состав подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций;
- аналитически обоснована возможность тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения;
- формализованы (на основе физического эксперимента) в виде номограмм значения: секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа; объема помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1;
- представлен алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества с целью тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций.

Теоретические основы организации тушения пожаров в коллекторах

Главной боевой задачей подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в соответствии с Боевым уставом является проведение боевых действий по тушению пожаров на месте пожара для спасения людей, достижения локализации и ликвидации пожара в кратчайшие сроки¹. При решении основной боевой задачи необходимо установить взаимосвязь между возможностями пожарных подразделений и пространственно-временными параметрами пожара. Тактические возможности главным образом определяются технической оснащенностью тактических подразделений и профессиональной подготовленностью личного состава. На реализацию этих возможностей оказывают влияние внешние факторы, возникающие на пожаре.

В полной мере с перечисленными сложностями при тушении крупных пожаров сталкиваются пожарные подразделения в коллекторах для инженерных коммуникаций.

При эффективной реализации ключевой боевой задачи с обеспечением безопасных условий

ведения боевых действий в коллекторах для инженерных коммуникаций предлагается использовать автомобиль газового тушения АГТ-1, для информационно-аналитической поддержки принимаемых решений руководителем тушения пожара (РТП) — алгоритм обоснования ресурсов пожарных подразделений для тушения пожаров в коллекторе для инженерных коммуникаций автомобилями газового тушения.

Пожары в коллекторах развиваются стремительно и пожарные подразделения из-за ограничений, прежде всего по охране труда, не могут реализовать свои возможности по тушению пожара на начальном этапе его развития. Необходимое количество пожарных подразделений прибывает с задержкой, что увеличивает время локализации пожара и ущерб от него. Кроме того, площадь пожара при значительном времени развития пожара может достигнуть максимальных размеров и распространиться на весь отсек коллектора. Поэтому основным условием локализации пожара в минимальные сроки может стать использование безопасного с точки зрения применения личным составом огнетушащего вещества.

Анализ пожаров в коллекторах показал, что к распространению пожаров до крупных размеров приводит длительное свободное развитие горения из-за вынужденных существенных затрат времени на отключение электроэнергии для обеспечения безопасности личного состава на пожаре. Как следствие, первоочередной управленческой задачей РТП является уменьшение времени подачи огнетушащих веществ для локализации пожара. Температура у выхода из отсека кабельного коллектора через 50–60 мин горения достигает 1200 °С и более. Влияние на реализацию управленческого решения РТП оказывает высокая среднеобъемная температура в коллекторах и скоростью ее нарастания 300–400 °С/мин. Это объясняется тем, что горят кабели, длительное время находящиеся под токовой нагрузкой, изоляция которых нагревается изнутри до температуры 800 °С и выше; наблюдалось (иногда) одновременное воспламенение кабелей в нескольких местах и на значительной длине, вследствие прогрева изоляции до температуры самовоспламенения; отмечаются также: большая пожарная нагрузка в виде горючей изоляции (до 16–20 кг/м² или 220–1200 МДж/м²); удельная массовая скорость выгорания электрокабелей достигает 0,055 кг/(м²·с); предварительный прогрев электрокабелей по всей длине в результате прохождения токов в рабочем режиме; силовые кабели прекращают гореть после снятия с них напряжения; чрезвычайно плотное задымление высокотоксичными продуктами горения кабелей; высокая

¹ Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444 «Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ».

скорость распространения горения по кабелям. Скорость распространения горения в горизонтальном кабельном коллекторе, при прокладке кабеля по металлическим кронштейнам и снятом напряжении, составляет 0,1–0,4 м/мин. При наличии напряжения на кабелях и работе естественной общеобменной вентиляции линейная скорость может достигать 1,4 м/мин; наличие нагретого водяного пара из воды, подаваемой на тушение после снятия напряжения с кабелей; стекание расплавленных горящих масс изоляции; наличие горючего стекающего плава изоляции, масел из рубашки охлаждения; наличие в составе продуктов горения хлористого водорода, вызывающего ожоги открытых участков тела пожарных и затрудняющего поиск места горения; наличие рядом расположенных электроустановок и транзитных кабелей под напряжением; стесненные условия работы пожарных подразделений, участвующих в тушении пожара; необходимость применения звеньев газодымозащитников, дымососов; протяженность и сложная компоновка (вертикальные, горизонтальные, наклонные коммуникации) в кабельных сооружениях и коммуникациях; необходимость проведения действий по заземлению пожарных насосов, приборов подачи огнетушащих веществ, электрозащиты самих пожарных даже после получения письменного допуска на тушение; отсутствие на вооружении тактических подразделений приборов и устройств, с помощью которых можно определить отключение кабельных линий в коллекторе [13], — все это обосновывает необходимость применения таких методов и способов подачи огнетушащих веществ, которые обеспечили бы безопасную и одновременно эффективную ликвидацию горения кабельного хозяйства.

Порядок тушения пожаров обесточенных кабельных линий прописан в рекомендациях МВД СССР 1987 и 1991 гг.

После снятия напряжения с кабельных линий для тушения пожара могут быть использованы огнетушащие средства: углекислота, распыленная вода, воздушно-механическая пена, в отдельных случаях — порошковые огнетушащие составы (ПОС) или огнетушащие вещества в сочетаниях (пар, инертные газы). Возможно применение распыленной воды от пожарных стволов с требуемой интенсивностью не менее 0,24 л/(м²·с), подаваемой от пожарных автомобилей [13].

Перечисленные выше средства тушения пожара будут эффективными и безопасными при применении личным составом только при обесточивании кабельных линий. На начальном этапе без снятия напряжения проход пожарных подразделений в отсек коллектора невозможен. В этом случае наиболее результативным для применения огне-

тушащим веществом для тушения пожара в коллекторе независимо от его планировки может быть газ [14, 15], особенно, если подземное сооружение является достаточно крупным по объему [16]. Его подача реализует метод фактической поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями, которую можно идентифицировать как «пространственно-временной метод». Сущность пространственно-временных методов поддержки управления и принятия решений при ведении боевых действий пожарно-спасательными подразделениями заключается в выделении сил и средств на тушение пожара в зависимости от площади (объема) тушения, которые в свою очередь могут быть уточнены путем применения систем видеонаблюдения и контроля [17]. Методика их использования заключается в сравнении скорости роста площади тушения, обеспечиваемой средствами подачи огнетушащих веществ, и скорости роста площади пожара. В перспективе также можно было бы применять информацию о геометрических параметрах коллектора с помощью цифрового двойника [18].

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследований с применением газовых составов показал хорошие результаты, полученные при тушении пожаров коллекторов [19, 20].

Время подачи углекислого газа и его количество на тушение пожара определяется расчетом на основании характеристики коллектора и средств подачи углекислого газа, но не более 20 мин.

Для обоснования необходимой численности и технической оснащенности тактического подразделения пожарной охраны для реализации возможного тушения с подачей СО₂ необходимо в первую очередь определить геометрические параметры коллектора, а также долю объема в нем кабельных систем, которая, как правило, составляет не более 10 % от общего объема помещения.

Следует учитывать, что разделки коллектора не являются герметичными, соответственно, опасные факторы пожара могут распространиться через них в смежные коммуникации. Возможность организации тушения помещения углекислым газом оценивается через коэффициент негерметичности, который выражается как:

$$\delta = \frac{\sum F_n}{W_p},$$

где F_n — общая площадь проемов, м²;

W_p — объем защищаемого помещения, м³.

Таким образом, после вычисления геометрических параметров коллектора (объем помещения) рассчитывается количество СО₂, необходимое для

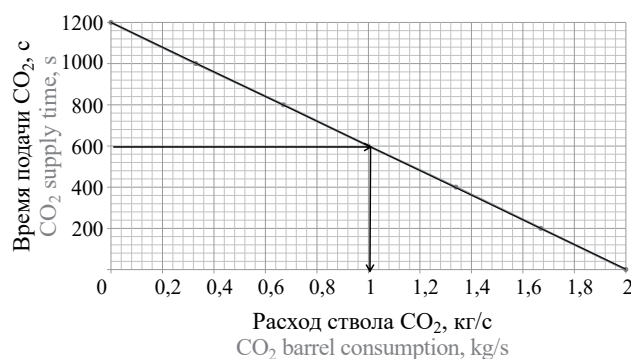


Рис. 1. Номограмма определения секундного расхода пожарного ствола по углекислоте (ключ — при времени подачи углекислоты 600 с расход ствола составит не менее 1 кг/с)

Fig. 1. Nomogram for determining the second consumption of a fire barrel by carbon dioxide (the key is that with a carbon dioxide supply time of 600 s, the barrel consumption will be at least 1 kg per second)

пожаротушения мобильными средствами пожаротушения, с учетом температуры в коллекторе, которая обычно не опускается ниже +5 °С.

Масса CO₂, требуемого для пожаротушения, определяется по формуле:

$$M_p = V_p \rho_1 (1 + K_2) \ln \frac{100}{100 - C_n},$$

где ρ_1 — плотность газового огнетушащего вещества с учетом высоты расположения защищаемого объекта относительно уровня моря для минимальной температуры в помещении, кг/м³;

K_2 — коэффициент, учитывающий потери газового огнетушащего вещества через проемы в ограждении помещения;

C_n — нормативная огнетушащая концентрация, %².

К примеру, необходимая масса углекислого газа для тушения пожара в распространенном типе коллектора для коммуникаций высотой 2,5 м, шириной 2,5 м и протяженностью 150 м составит около 740 кг и может быть обеспечена автомобилем газового тушения АГТ-1, нормативная перевозимая масса огнетушащего вещества у которого составляет 1000 кг. Оценка количества стволов для обеспечения тушения может быть проведена при помощи номограммы, указанной на рис. 1, а количество огнетушащего вещества, необходимого для тушения, по номограмме на рис. 2.

Требуемая масса газового огнетушащего состава в автомобиле газового тушения АГТ-1 для тушения пожара в объеме помещения определяется по номограмме (см. рис. 2).

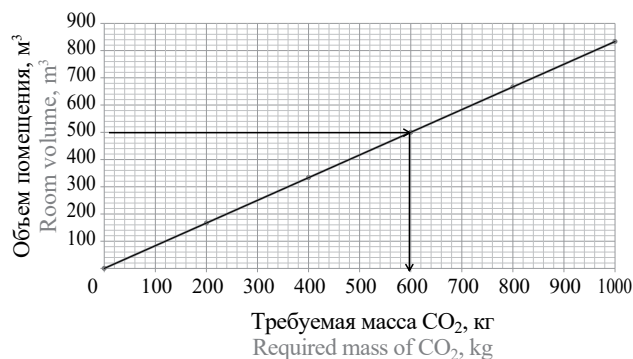


Рис. 2. Требуемая масса газового огнетушащего состава для тушения пожара в объеме помещения (ключ — для тушения пожара в объеме помещения 500 м³ требуется 600 кг CO₂)

Fig. 2. The required mass of gas extinguishing agent for extinguishing a fire in the volume of the room (the key is that 600 kg of CO₂ is required to extinguish a fire in the volume of the room 500 m³)

Для доставки огнетушащего состава к месту пожара можно и целесообразно использовать автомобиль газового тушения (АГТ-1). Масса огнетушащего состава составляет 1000 кг. При выполнении условий герметизации помещения такого количества должно хватить для тушения пожара объемным способом до 1000 м³. Имеющимся на автомобиле стволом (расход 2 кг/с) возможно добиться огнетушащей концентрации газа по всему объему помещения, так как требуемый расход на тушение составляет 0,62 кг/с.

Для оптимизации выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций разработан алгоритм, представленный на рис. 3.

Выводы

На основе новых исходных данных (секундный расход пожарного ствола при подаче углекислого газа в объем помещения) получено новое знание (возможность тушения пожара углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций передвижной пожарной техникой) в соответствии с возможностями привлекаемых для этого пожарными подразделениями. Разработан алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества (углекислый газ) для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций.

Проведенный анализ (по описаниям пожаров) оперативных действий пожарных подразделений в коллекторах для инженерных коммуникаций позволил выделить 20 признаков (параметров), оказывающих влияние на ведение боевых действий пожарных подразделений, аналитически обоснована возможность тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения на примере отсека кол-

² СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

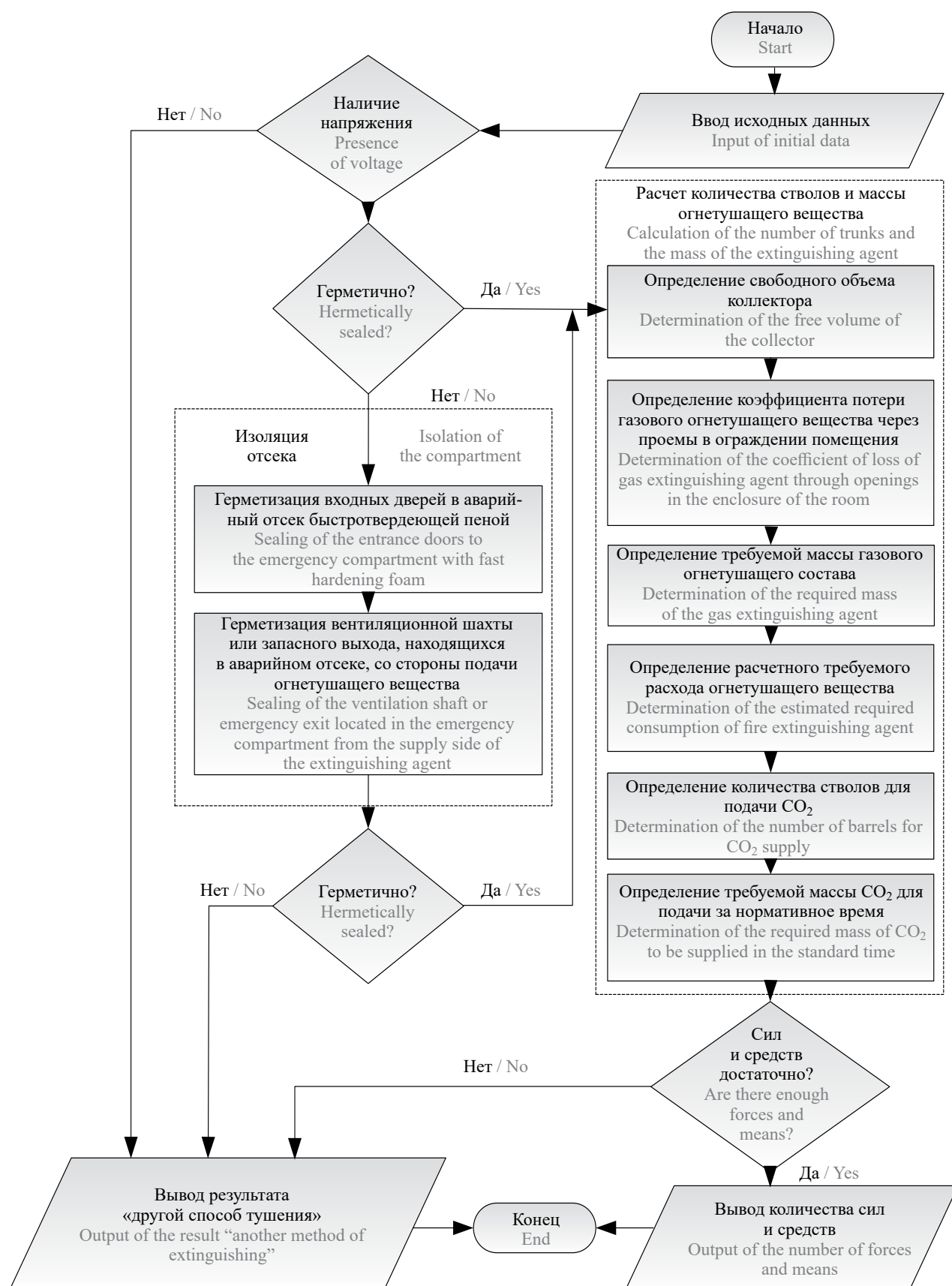


Рис. 3. Алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций

Fig. 3. Algorithm for selecting fire extinguishing agents and their quantity for extinguishing a fire in a collector for engineering communications

лектора при помощи автомобиля газового тушения АГТ-1, также обосновано преимущество применения газовых составов от передвижной пожарной техники перед автоматической системой пожаротушения, которое состоит в том, что сработавшая автоматическая система не может локализовать пожар вследствие негерметичности помещения отсека на момент пожара и огнетушащая концентрация газового огнетушащего состава не возникает. Пожарные подразделения в ходе разведки пожара и подачи стволов обеспечивают герметичность отсека, достигают ликвидации пожара в минимальные сроки.

Формализованы в виде номограмм значения: секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа; объема помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1; алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций; доказано, что автомобиль газового тушения АГТ-1 может быть применен на любом

коллекторе для инженерных коммуникаций, независимо от оснащения коллектора автоматической установкой пожаротушения и времени снятия напряжения с кабельных линий, что повышает эффективность оперативных действий пожарных подразделений. Время подачи газового огнетушащего состава для тушения пожара составит не более 20 мин.

Проведена адаптация методики расчета массы газового огнетушащего вещества для автоматических установок газового пожаротушения при тушении объемным способом для мобильных средств пожаротушения (время подачи CO_2 с нормативных 20 с до минимально возможных по тактико-техническим характеристикам автомобиля АГТ-1 20 мин).

Доказана целесообразность применения автомобиля газового тушения по тушению пожаров коллекторов для инженерных коммуникаций, как наиболее эффективного средства тушения пожаров кабельных линий под напряжением и после снятия напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Lanchava O. et al.* Prospects of usage of transforming systems for extinguishing fire in tunnels // International Scientific Conference “Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas”. Tbilisi. 2009. Pp. 302–308.
2. *Carvel R.* Fire protection in concrete tunnels // The Handbook of Tunnel Fire Safety. Thomas Telford Publishing. London, 2005. Pp. 110–126.
3. *Lin C.L., Chien C.F.* Lessons learned from critical accidental fires in tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 113. P. 103944. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103944
4. *Palm A., Kumm M., Ingason H.* Full-scale tests of alternative methods for fire fighting in underground structures // Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security. Marseille, France. March 12–14, 2014. Pp. 573–582.
5. *Song W. et al.* Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques — an overview // Archives of Mining Sciences. 2021. Vol. 66. Issue 2. DOI: 10.24425/ams.2021.137463
6. *Zhou J. et al.* Evolution Behaviors and Properties of Power Compartment Fires in Underground Urban Utility Tunnels : a review // 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE. 2023. Pp. 771–778. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10165832
7. *Полехин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Чечетина Т.А.* Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : статистич. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2021. 112 с.: ил. 5.
8. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году : стат. сб. / под ред. А.В. Матюшина. М. : ВНИИПО, 2016. 124 с.: ил. 40.
9. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2017. 124 с.: ил. 40.
10. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2018. 125 с.: ил. 42.
11. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2019. 125 с.: ил. 42.
12. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.: ил. 30.
13. *Григорьев А.Н., Подгруппный А.В.* Тактические приемы и способы тушения пожаров в кабельных коллекторах для инженерных коммуникаций оперативными подразделениями пожарной охраны // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 1. С. 75–82.
14. *Niu Y., Li W.* Simulation study on value of cable fire in the cable tunnel // Procedia Engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 569–573. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.100
15. *Marke P.* Cable tunnels — an integrated fire detection/suppression system for rapid extinguishment // Fire technology. 1991. Vol. 27. Pp. 219–233. DOI: 10.1007/BF01038448

16. Kun-sheng L.I. et al. Experimental study on carbon dioxide gas fire extinguishing technology in large buried cable tunnel // *Fire Science and Technology*. 2022. Vol. 41. Issue 7. P. 954.
17. Shahrour I. et al. Smart monitoring system for risk management in the underground space // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019. Vol. 281. P. 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201928101005
18. Lee J. et al. Implementing a Digital Twin of an Underground Utility Tunnel for Geospatial Feature Extraction Using a Multimodal Image Sensor // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 16. P. 9137. DOI: 10.3390/app13169137
19. Ge L. et al. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 142. Pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.005
20. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Тушение углекислым газом пожаров в закрытых помещениях // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф., Москва, 16–17 ноября 2016 г. М. : НИУ МГСУ, 2017. С. 353–357.

REFERENCES

1. Lanchava O. et al. Prospects of usage of transforming systems for extinguishing fire in tunnels. *International Scientific Conference “Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas”*. Tbilisi. 2009; 302-308.
2. Carvel R. Fire protection in concrete tunnels. *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. Thomas Telford Publishing, London. 2005; 110-126.
3. Lin C.L., Chien C.F. Lessons learned from critical accidental fires in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021; 113:103944. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103944
4. Palm A., Kumm M., Ingason H. Full-scale tests of alternative methods for fire fighting in underground structures. *Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security*. Marseille, France. March 12–14, 2014. 2014; 573-582.
5. Song W. et al. Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques — an overview. *Archives of Mining Sciences*. 2021; 66(2). DOI: 10.24425/ams.2021.137463
6. Zhou J. et al. Evolution Behaviors and Properties of Power Compartment Fires in Underground Urban Utility Tunnels : a review. *2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. IEEE. 2023; 771-778. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10165832
7. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Kozlov A.A., Firsov A.G., Sibirko V.I., Goncharenko V.S., Chechetina T.A. Under the gen. ed. of D.M. Gordienko. *Fires and fire safety in 2020 : statistical collection*. 2021; 112: fig. 5 (rus).
8. Matyushin A.V. *Fires and fire safety in 2015 : statistical collection*. 2016; 124: fig. 40 (rus).
9. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2016 : statistical collection*. 2017; 124: fig. 40 (rus).
10. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2017 : statistical collection*. 2018; 125: fig. 42 (rus).
11. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2018 : statistical collection*. 2019; 125: fig. 42 (rus).
12. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2019 : statistical collection*. 2020; 80: fig. 30 (rus).
13. Grigoryev A.N., Podgrushnyy A.V. Tactical techniques and methods of extinguishing fires in cable collectors for engineering communications by operational fire protection units. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2009; 1:75-82 (rus).
14. Niu Y., Li W. Simulation study on value of cable fire in the cable tunnel. *Procedia Engineering*. 2012; 43:569-573. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.100
15. Marke P. Cable tunnels — an integrated fire detection/suppression system for rapid extinguishment. *Fire technology*. 1991; 27:219-233. DOI: 10.1007/BF01038448
16. Kun-sheng L.I. et al. Experimental study on carbon dioxide gas fire extinguishing technology in large buried cable tunnel. *Fire Science and Technology*. 2022; 41(7):954.
17. Shahrour I. et al. Smart monitoring system for risk management in the underground space. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019; 281:01005. DOI: 10.1051/mateconf/201928101005
18. Lee J. et al. Implementing a Digital Twin of an Underground Utility Tunnel for Geospatial Feature Extraction Using a Multimodal Image Sensor. *Applied Sciences*. 2023; 13(16):9137. DOI: 10.3390/app13169137
19. Ge L. et al. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 142:174-190. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.005
20. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Extinguishing fires with carbon dioxide in enclosed spaces. *Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education Proceedings of the International Scientific Conference*. Moscow, 2017; 353-357 (rus).

Поступила 30.05.2023, после доработки 07.09.2023;

принята к публикации 18.09.2023

Received May 30, 2023; Received in revised form September 7, 2023;

Accepted September 18, 2023

Информация об авторах

ГРИГОРЬЕВ Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcuringa@mail.ru

ЗАХАРЕВСКИЙ Виктор Борисович, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

ЕВТЕЕВ Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0003-1642-2358; SPIN: 7499-0486; e-mail: garnett21@list.ru

АНИКИН Сергей Николаевич, адъюнкт кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0002-8996-0192; SPIN: 9419-3590; e-mail: neytrinos@mail.ru

Вклад авторов:

Григорьев А.Н. — идея; научное руководство.

Захаревский В.Б. — сбор материала.

Евтеев Д.С. — написание статьи.

Аникин С.Н. — обработка материала; научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Alexey N. GRIGORIEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), 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; ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcuringa@mail.ru

Viktor B. ZAKHAREVSKIY, Senior Lecturer of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), 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; ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

Dmitriy S. EVTEEV, Senior Lecturer of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), 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; ORCID: 0000-0003-1642-2358; SPIN: 7499-0486; e-mail: garnett21@list.ru

Sergey N. ANIKIN, Postgraduate at the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), 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; ORCID: 0000-0002-8996-0192; SPIN: 9419-3590; e-mail: neytrinos@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexey N. Grigoriev — idea; scientific guidance.

Viktor B. Zakharevskiy — collection of material.

Dmitriy S. Evteev — writing an article.

Sergey N. Anikin — material processing; scientific editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/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, предположениями, 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 вверху 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!