3-2023

FIRE and EXPLOSION SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПАРКЕТОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ

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

№3 ТОМ 32 2023

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

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

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

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

Префикс DOI: 10.22227

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

Адрес редакции:
129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Адрес для переписки:
129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8

E-mail: info@fire-smi.ru
https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 26.06.2023.
Выход в свет 29.06.2023.
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, Ньютаунабби, Великобритания)

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 университет, 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 университет, Воронеж, Россия)

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

Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государственной 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 деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

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

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государственной службы, Будапешт, Венгрия)

Серков Б.Б., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Академия Государственной 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

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

XI Международная конференция «Полимерные материалы пониженной горючести» 19–22 сентября 2023 г., г. Волгоград, Россия — 5

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО
Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам — 9

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

И.А. БОЛОДЬЯН, Л.П. ВОГМАН, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО
Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести — 17

Т.Ю. ЕРЕМИНА, О.В. СУШКОВА
Исследования характеристик пожарной опасности паркетов исторических объектов с массовым пребыванием людей — 31

В.А. УШКОВ, А.В. ГОРЮНОВА, М.Е. ЗОЛОТАРЕВ, М.В. УШКОВ
Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров — 41

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Д.Е. ШАБУНИНА, А.И. ДАНИЛОВ, М.В. ГРАВИТ
Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров — 54

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

А.В.ПЕХОТИКОВ, А.А. АБАШКИН, А.В. ГОМОЗОВ, С.А. ЛУЧКИН
Расчетная оценка эффективности технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток при пожаре в жилых зданиях — 69

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В.И. ЕВДОКИМОВ, Е.В. БОБРИНЕВ, А.А. КОНДАШОВ, Ю.В. ГУДЗЬ, Е.Ю. УДАВЦОВА
Региональные риски производственных травм и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.) — 82

ВОПРОС – ОТВЕТ

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3 — 93

CONTENTS

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

XI International Conference "Polymeric materials of low flammability" September 19–22, 2023, Volgograd, Russia — 5

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

A.D. KOROLCHENKO
Experimental determination of resistance of prefabricated metal structures to blast loads — 9

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

I.A. BOLODYAN, L.P. VOGMAN, D.A. KOROLCHENKO
Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability — 17

T.Yu. EREMINA, O.V. SUSHKOVA
Research of fire hazard characteristics of parquet floor in historical public buildings — 31

V.A. USHKOV, A.V. GORYUNOVA, M.E. ZOLOTAREV, M.V. USHKOV
Influence of phosphorus-containing flame retardants on fire hazard indices of gas-filled polymers based on reactive oligomers — 41

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

D.E. SHABUNINA, A.I. DANILOV, M.V. GRAVIT
Method of mathematical modelling of passenger flows to justify the space-planning solutions of underground stations and calculate passenger evacuation — 54

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

A.V. PEKHOTIKOV, A.A. ABASHKIN, A.V. GOMOZOV, S.A. LUCHKIN
Calculation evaluation of the effectiveness of technical solutions for natural ventilation of ordinary staircases in case of fire in residential buildings — 69

LIFE SAFETY

V.I. EVDOKIMOV, E.V. BOBRINEV, A.A. KONDASHOV, Yu.V. GUDZ, E.Yu. UDAVTSOVA
Regional risks of occupational injuries and death of personnel of the Federal Firefighting Service of the Emercom of Russia (2006–2020) — 82

QUESTION – ANSWER

A.S. KHARLAMENKOV
Modern extinguishing methods for lithium-ion batteries. Part 3 — 93

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.

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2023

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

Определение устойчивости металлических конструкций к взрывам

Стр. 9

Стр. 31

Исследования характеристик пожарной опасности паркетов

Моделирование пассажиропотоков для расчета эвакуации

Стр. 54

Стр. 69

Естественное проветривание лестничных клеток при пожаре

Стр. 93

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

FIRE AND EXPLOSION SAFETY

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

No.3 VOL. 32 2023

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 Attistation Commission of the Russian Federation for publishing aspirants' works for candidate and doctoral degree, in Abstracting Journal and Database of VINITI RAS, EBSCO. Information about the journal Is annually published in "Ulrich's Periodicals Directory". English version of "Fire and Explosion Safety" articles is included in Chemical Abstract Service (CAS).

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

Signed for printing 26.06.2023.
Date of publication 29.06.2023.
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 Engineering, 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 Science (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)

Второй циркуляр

Российская академия наук
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН
Волгоградский государственный технический университет
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан
Научно-исследовательский институт проблем горения Республики Казахстан
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН
Международная ассоциация специалистов пожарной, промышленной и экологической безопасности

XI Международная конференция

«ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ»

Место проведения конференции: Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, д. 28

Дата проведения: 19–22 сентября 2023 г.

Официальная страница конференции — http://pmpg-2023.vstu.ru

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Берлин А.А.	Научный руководитель ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, академик РАН

Сопредседатель:

Навроцкий А.В.	Ректор Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ), д.х.н.

Заместитель председателя:

Сивенков А.Б.	Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, Президент МАСППЭБ, д.т.н.

Члены организационного комитета

Алдошин С.М.	Вице-президент РАН, академик РАН
Алешков М.В.	Заместитель начальника Академии ГПС МЧС России по научной работе, д.т.н.
Анаников В.П.	Заведующий лабораторией металлокомплексных и наноразмерных катализаторов, ФГБУН ИОХ им. Н.Д. Зелинского РАН, академик РАН
Асеева Р.М.	Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, д.х.н.
Аскадский А.А.	Заведующий лабораторией полимерных материалов, ИНЭОС РАН, д.х.н.
Ашуров Н.Р.	Заведующий лабораторией НИЦ Химии и физики полимеров при Национальном университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека, д.т.н.
Барботько С.Л.	Начальник лаборатории, ФГУП ВИАМ, д.т.н.
Богданова В.В.	Заведующая лабораторией огнетушащих материалов НИИ ФХП Белорусского государственного университета, д.х.н.
Варфоломеев С.Д.	Научный руководитель ИБХФ РАН им. Н.М. Эмануэля РАН, член-корр. РАН
Гаращенко А.Н.	Ведущий научный сотрудник, АО «ЦНИИСМ», д.т.н.
Зыбина О.А.	Заместитель начальника Санкт-Петербургского Государственного университета ГПС МЧС России, д.т.н.
Кадыкова Ю.А.	Профессор каф. ЭЛЭТ, СГТУ им. Гагарина Ю.А., д.т.н.
Каблов В.Ф.	Профессор каф. ВТПЭ, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, д.т.н.
Константинова Н.И.	Главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России, д.т.н.
Коробейничев О.П.	Главный научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, ИХКГ им. В.В. Воеводского СО РАН, д.ф.-м.н.
Корольченко Д.А.	Заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, НИУ МГСУ, д.т.н.
Ломоносов И.В.	И.о. директора ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, член-корр. РАН
Любавин Н.С.	Начальник Главного управления МЧС России по Волгоградской области, генерал-майор
Лысак В.И.	Научный руководитель ВолгГТУ, академик РАН
Мансуров З.А.	Генеральный директор Института проблем горения, академик МАН ВШ Республики Казахстан, д.х.н.
Музафаров А.М.	НЭОС РАН, академик РАН
Мухамедгалиев Б.А.	Профессор каф. строительных материалов и химии, Ташкентский архитектурно-строительный институт, д.х.н.
Негматов С.С.	Научный руководитель ГУП «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, академик Академии наук Республики Узбекистан
Новаков И.А.	Президент ВолгГТУ, академик РАН
Озерин А.Н.	Научный руководитель ФГБУН ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН, член-корр. РАН
Покровская Е.Н.	Профессор каф. КБС, НИУ МГСУ, д.т.н.
Пономаренко С.А.	Директор ФГБУН ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН, член-корр. РАН

Серков Б.Б.	Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, д.т.н.
Стороженко П.А.	Первый заместитель генерального директора, научный руководитель ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», академик РАН
Трифонов А.А.	Директор ФГБУН ИНЭОС РАН, член-корр. РАН
Шарипханов С.Д.	Начальник Академии гражданской защиты МЧС Республики Казахстан, д.т.н.
Ярославов А.А.	Заведующий кафедрой, МГУ им. М.В. Ломоносова, член-корр. РАН

Ученые секретари:

Ваниев М.А.	Заведующий кафедрой, ВолгГТУ, д.т.н.
Круглов Е.Ю.	Старший научный сотрудник, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Новаков И.А.	Президент ВолгГТУ, академик РАН

Члены программного комитета:

Альменбаев М.М.	Начальник факультета, Академия ГЗ МЧС Республики Казахстан, к.т.н.
Анохин Е.А.	Главный научный сотрудник, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.
Гравит М.В.	Доцент ВШПГиДС, Инженерно-строительный институт СПбПУ, к.т.н.
Кейбал Н.А.	Заведующий кафедрой, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, д.т.н.
Кобелев А.А.	Доцент кафедры ПБС, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.
Макишев Ж.К.	Начальник кафедры пожарной профилактики, Академия ГЗ МЧС Республики Казахстан, к.т.н.
Рева О.В.	Профессор каф. химической, биологической, радиационной и ядерной защиты, УГЗ МЧС Республики Беларусь, к.х.н.
Сидоренко Н.В.	Доцент каф. ХТПЭ, ВолгГТУ, к.т.н.
Тужиков О.О.	Заведующий кафедрой, ВолгГТУ, д.т.н.
Шишкин Е.В.	Декан химико-технологического факультета ВолгГТУ, д.х.н.

Технические секретари:

Борисов С.В.	ВолгГТУ, доцент, к.т.н.
Буравов Б.А.	ВолгГТУ, доцент, к.т.н.
Соловьева Ю.В.	ВолгГТУ, ведущий инженер
Федотов И.О.	Академия ГПС МЧС России, адъюнкт

Основные направления научной конференции:

- *Химия и технология функциональных полимеров и материалов на их основе;*
- *Механизм действия и синтез новых высокоэффективных ингибиторов горения полимеров;*
- *Разработка новых полимерных материалов и композиций пониженной горючести;*
- *Термоокислительная деструкция и пиролиз полимеров;*
- *Теория горения полимерных материалов;*
- *Экологическая и противопожарная безопасность материалов и конструкций;*
- *Техника и методы оценки пожарной безопасности полимерных материалов;*
- *Методы и средства обеспечения требуемой пожарной безопасности строительных конструкций из полимерных материалов;*
- *Анализ чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.*

Программа конференции *включает пленарные, устные и стендовые доклады, а также конкурс на лучшую работу молодых ученых. Планируется проведение круглого стола.*

Ключевые даты

26 декабря 2022 г.	*Рассылка первого циркуляра*
15 февраля 2023 г.	*Начало регистрации участников на сайте ВолгГТУ*
1 марта 2023 г.	*Рассылка второго циркуляра*
1 июня 2023 г.	*Окончание регистрации участников*
15 июня 2023 г.	*Окончание приема материалов докладов*
1 июля 2023 г.	*Окончание оплаты оргвзноса*
19–22 сентября 2023 г.	*Работа конференции*

Правила оформления материалов

- *Материалы доклада, объем которого должен составлять 2–3 стр., предоставляются по электронным адресам: pmpg-2023@vstu.ru; 89268196698@mail.ru;*
- *Текст должен быть набран в редакторе Word for Windows шрифтом «Times New Roman Cyr» с высотой шрифта 14, межстрочный интервал 1,5;*
- *Поля страницы: слева и справа — 2,5 см, сверху — 2 см, снизу — 3 см;*
- *Формулы набираются в MS Equation;*
- *Рисунки и схемы в тексте должны быть сгруппированы;*
- *Нумерованные и маркированные списки в тексте не допускаются.*

Порядок печати материалов

Название по центру без переноса полужирным шрифтом строчными буквами, через интервал инициалы и фамилия автора строчными буквами, через интервал полное название организации, далее через интервал текст, в конце которого при необходимости привести список литературы (не более 5 наименований).

За содержание докладов ответственность несут авторы. Программный комитет имеет право отклонить доклад. Все материалы публикуются в авторской редакции.

Оргвзнос

Очное участие	**5000 руб.**
Заочное участие	**1500 руб.**
Студенты и аспиранты	**1000 руб.**

Рекомендуемые гостиницы для проживания участников конференции, из которых будет организован трансфер: «Интурист», «Волгоград», «Южный», «Hampton by Hilton Volgograd». Предусмотрено также размещение в санатории-профилактории ВолгГТУ (стоимость 525 руб. в сутки без питания).

Информация по банковским реквизитам для перечисления оргвзносов (реквизиты ВолгГТУ) размещена на официальной странице конференции http://pmpg-2023.vstu.ru.

Адрес проведения конференции

Волгоградский государственный технический университет; Российская Федерация, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, д. 28.

Справки по телефонам: ***в Волгограде (ВолгГТУ, кафедра ХТПЭ) (8442) 24-80-31***
в Москве: Круглов Евгений Юрьевич +7 (925) 344-19-43
Федотов Илья Олегович +7 (925) 495-93-78

Программа конференции

18 сентября — *заезд участников, размещение участников в гостиницах г. Волгограда.*
19 сентября — *регистрация участников, открытие конференции, пленарное заседание, работа секций, экскурсия по городу-герою Волгограду, товарищеский ужин на теплоходе.*
20 сентября — *работа секций, экскурсия по ВолгГТУ, стендовые секции, круглый стол «Полимерные материалы пониженной горючести. Инновации: проблемы и перспективы».*
21 сентября — *работа секций, подведение итогов конкурса на лучший доклад молодых ученых.*
22 сентября — *подведение итогов, официальное закрытие конференции.*
Отъезд участников конференции.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 9–16
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):9-16

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16

Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам

Антон Дмитриевич Корольченко ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварийные газовые взрывы происходят как на производственных объектах, так и в жилых зданиях. Был проведен анализ нормативных документов в области взрывоустойчивости зданий и конструкций, подверженных аварийному взрыву, который выявил отсутствие требований к ним по взрывоустойчивости и методов испытаний их на устойчивость к дефлаграционному аварийному взрыву.
Цель. Коллективом Института комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ИКБС НИУ МГСУ) была разработана методика испытаний по определению устойчивости сборных металлических конструкций к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси и проведено исследование, включающее два эксперимента и анализ результатов с целью определить возможность применения ограждающих конструкций в области взрывозащиты зданий и сооружений от избыточного давления дефлаграционного взрыва.
Материалы и методы. Исследования проводились с использованием стенда для испытаний легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) по ГОСТ Р 56289. В качестве образцов для испытаний были применены сборные металлические конструкции, состоящие из стеновых сэндвич-панелей толщиной 200 мм и металлического каркаса из двух стальных труб сечением 100 мм. В процессе исследований контролировалось разрушение замкового соединения стыка панелей и полное разрушение ограждающей конструкции.
Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что при избыточном давлении взрыва 17–18 кПа и времени воздействия взрывной нагрузки не менее 250 мс наблюдалась значительная деформация конструкции с остаточным прогибом. Полное разрушение конструкции происходило при интенсивности динамического воздействия во взрывной волне 45–47 кПа и времени воздействия взрывной нагрузки около 400 мс.
Выводы. Установлено, что сборная металлическая конструкция, состоящая из стеновых сэндвич-панелей и металлического каркаса, может быть использована в качестве взрывоустойчивого защитного ограждения на производственных объектах при расчете взрывных нагрузок. Предложено несколько вариантов повышения устойчивости конструкции к воздействию дефлаграционного взрыва.

Ключевые слова: аварийный взрыв газа; взрывобезопасность; взрывозащитные конструкции; стеновые сэндвич-панели; промышленная безопасность

Благодарности: автор выражает благодарность руководителю научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» ИКБС НИУ МГСУ Комарову Александру Андреевичу за помощь в проведении анализа результатов исследования

Для цитирования: *Корольченко А.Д.* Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 9–16. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16

✉ *Корольченко Антон Дмитриевич*, e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru

Experimental determination of resistance of prefabricated metal structures to blast loads

Anton D. Korolchenko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Emergency gas explosions occur at industrial facilities as well as in residential buildings. An analysis of normative documents in the field of explosion resistance of buildings and structures subject to an accidental gas explosion has been carried out which revealed a lack of requirements for their explosion resistance and methods of testing their resistance to a deflagration accidental explosion.

© А.Д. Корольченко, 2023

Objective. A team from the Institute of Comprehensive Construction Safety at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) developed a test procedure for determining the resistance of prefabricated metal structures to a deflagration explosion of an air-gas mixture and conducted a study including two experiments and analysis of the results to determine the application of building envelopes in the field of explosion protection of buildings and structures against excessive pressure deflagration

Materials and methods. The researches have been carried out with the use of a test bench for light-load-bearing constructions according to GOST R 56289. Fabricated metal structures, consisting of 200-mm-thick wall sandwich-panels and metal frame of two steel pipes of 100-mm section were used as test specimens. In the course of the investigations, the failure of the locking joint of the panels and the complete failure of the enclosing structure were monitored.

Results and discussion. Studies have shown that with an overpressure of 17–18 kPa and the exposure time of blast load of at least 250 ms, a significant deformation of the structure with a residual deflection was observed. Complete destruction of the structure occurred at the intensity of the dynamic impact in a 45–47 kPa blast wave and the exposure time of the blast load about 400 ms.

Conclusions. It has been established that the prefabricated metal structure consisting of wall sandwich panels and a metal frame can be used as an explosion-proof protective fence at production facilities in the calculation of blast loads. Several variants of increasing resistance of the structure to deflagration explosion have been proposed.

Keywords: emergency gas explosion; explosion safety; explosion-proof structures; wall sandwich panels; industrial safety

Acknowledgements: the author expresses his gratitude to Alexander A. Komarov, Head of the Research Center "Explosion Safety" NRU MGSU for his help in analyzing the results of the study

For citation: Korolchenko A.D. Experimental determination of resistance of prefabricated metal structures to blast loads. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):9-16. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16 (rus.).

✉ Anton D. Korolchenko, e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru

Введение

Аварийные газовые взрывы происходят как на производственных объектах, так и в жилых зданиях. Этим обстоятельством обусловлена актуальность решения проблемы обеспечения взрывозащиты объектов, в частности взрывоустойчивости конструкций и зданий. С этой целью был проведен анализ действующей в Российской Федерации базы нормативных документов в области взрывоустойчивости зданий и конструкций, подверженных воздействию дефлаграционного взрыва [1–6]. Для производственных зданий и помещений определено понятие взрывоопасного объекта.

В первую очередь следует упомянуть СП 56.13330.2021[1], где даны требования к взрывоустойчивым зданиям. В п. 5.2.2[1] определено, что здания, которые могут быть подвержены воздействию внешних аварийных взрывов (пункты управления, операторные и т.п.), следует выполнять взрывоустойчивыми: «Обеспечение взрывоустойчивости при внешних аварийных взрывах может осуществляться снижением избыточного давления взрыва за счет удаления зданий от потенциальных источников взрыва, а также повышением прочности и устойчивости конструкций к действию динамических нагрузок от воздушной волны взрыва».

В ГОСТ Р 57471–2017[2] приведены термины и определения взрывозащитных металлических конструкций. Данный документ предусматривает подтверждение взрывоустойчивости конструкций посредством использования взрывчатого вещества и воздействия на них воздушной ударной волной (ВУВ). При испытании производится воздействие избыточным давлением во фронте ВУВ.

Основываясь на рассмотренных нормативных документах, можно сделать вывод, что на сегодняшний день практически не существует требований к конструкциям по взрывоустойчивости и методов испытаний их на устойчивость к дефлаграционному аварийному взрыву. В связи с этим коллективом лаборатории газодинамики и взрыва ИКБС НИУ МГСУ была разработана методика испытаний на устойчивость ограждающей конструкции (ОК) из сэндвич-панелей к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси. На основании методики были проведены два эксперимента с целью исследовать возможность применения ограждающих конструкций в области взрывозащиты зданий и сооружений от избыточного давления дефлаграционного взрыва [7–12].

В процессе исследований необходимо было определить максимальное избыточное давление в результате дефлаграционного взрыва газовоздушной смеси, при котором происходит разрушение сборной металлической конструкции из стеновых сэндвич-панелей на металлическом каркасе.

Материалы и методы

Исследования проводились с использованием стенда для испытаний легкосбрасываемых кон-

[1] СП 56.13330.2021 «Свод правил. Производственные здания. СНиП 31-03–2001» (п. 5.2).

[2] ГОСТ Р 57471–2017 «Конструкции взрывозащитные металлические. Общие технические требования и методы испытаний».

струкций (ЛСК) на воздействие внутреннего аварийного взрыва по ГОСТ Р 56289–2014[3]. Стенд состоит из испытательной взрывной камеры (далее — взрывокамера), системы измерения избыточного давления, системы скоростной видеосъемки. Взрывокамера, способная выдержать давление дефлаграционного взрыва до 2 бар, представляет собой установку кубической формы с рабочим объемом 10 м^3 и имеет проем для установки образца конструкции сечением до 1,6 × 1,3 м, глубиной 0,2 м. Система сброса давления включает сбросной проем сечением 0,7 × 0,7 м, который с внутренней стороны закрывается металлическими передвижными створками для изменения его сечения, а снаружи — клапаном с давлением вскрытия, равным 0 Па. На боковых гранях взрывокамеры располагаются датчики избыточного давления.

В качестве образцов для испытаний были использованы сборные металлические конструкции — сэндвич-панели, предназначенные для строительства зданий и сооружений. Сэндвич-панель — панель стеновая металлическая трехслойная с утеплителем из минераловатных плит размером 1600 × 1200 × 200 мм, с толщиной металлического листа 0,6 мм, с покрытием, нанесенным порошковой краской. Металлический каркас состоит из двух профильных стальных труб сечением 100 × 100 мм, с толщиной стенки 5 мм и межосевым расстоянием между трубами 1400 мм. Крепление сэндвич-панелей к металлическому каркасу осуществляется самосверлящимися винтами длиной 240 мм (по 8 винтов на каждую трубу металлического каркаса). Сэндвич-панели монтировались таким образом, чтобы при установке в проем замковые соединения двух частей сэндвич-панелей совпадали. Замковое соединение не уплотнялось [7, 13–16].

В процессе исследований контролировались два параметра: разрушение замкового соединения стыка панелей и полное разрушение ограждающей конструкции.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент 1. На рис. 1 представлены мгновенные снимки процесса дефлаграционного взрыва пропановоздушной смеси в камере, сбросной проем которой оборудован исследуемой на устойчивость стеновой панелью (образец 1). Киносъемка проводилась со скоростью 156 кадров в секунду. На рис. 1, *a* зафиксирован момент воспламенения смеси в камере (кадр 210). В этот момент зажигается лампочка, что хорошо видно на фотографии. На рис. 1, *b* приведен момент прорыва пламени через неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели. На рис. 1, *c*–*h* даны снимки процесса через каждые 10 кадров или каждые 64,1 мс.

Значения давления взрыва, зарегистрированные тремя датчиками давления, установленными на гранях камеры, приведены на рис. 2. Известно, что при дефлаграционном взрыве в помещениях кубической или близкой к кубической форме соблюдается принцип квазистатичности давления взрыва, что обусловлено малой видимой скоростью пламени по сравнению со скоростью звука. В соответствии с этим принципом давление взрыва зависит только от времени и не зависит от координаты расположения датчика. Поэтому на рис. 2 приведено среднее значение давления, полученное путем осреднения показаний трех датчиков, установленных в камере.

На рис. 2 отмечены моменты времени (точки *1*–*5*), которым соответствуют мгновенные снимки, приведенные на рис. 1, *a*, 1, *b*, 1, *e*, 1, *f* и 1, *h*.

Точка *2* на рис. 2 соответствует времени 576,9 мс после начала взрывного горения смеси (кадр 300, см. рис. 1, *b*). Давление взрыва в этот момент составляло 16,8 кПа. На рис. 1, *b* видно, что в данный момент начинается истечение (прорыв) продуктов взрыва (взрывного горения) через неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели. Давление, зафиксированное в точке *2*, вызывает начало смещения (деформации) панели, что приводит к появлению дополнительных сбросных площадей, а также к расширению и увеличению уже имеющихся. Этот процесс хорошо виден на рис. 1, *e* и *f*, соответствующих моментам времени 769,2 и 833,3 мс (кадры 330 и 340 скоростной киносъемки). Появление дополнительных сбросных проемов приводит к резкому снижению давления взрыва внутри камеры (см. рис. 2). Снимок на рис. 1, *h* соответствует моменту времени 961,5 мс (кадр 360), который характеризуется сильной деформацией панели, значительным вскрытием закрываемого панелью проема и снижением внутреннего давления в камере практически до нуля (см. рис. 2).

Эксперимент 2. Рассмотрим результаты опыта с аналогичной панелью (образец 2), но при других условиях проведения испытания в камере. Киносъемка, как и в эксперименте 1, проводилась со скоростью 156 кадров в секунду.

На рис. 3 представлены мгновенные снимки процесса дефлаграционного взрыва пропановоздушной смеси в камере, сбросной проем которой оборудован исследуемой на устойчивость стеновой панелью 2. На рис. 3, *a* приведен момент воспламенения смеси в камере (кадр 432). В этот момент зажигается лампочка, что хорошо видно на снимке. На рис. 3, *b* приведен момент прорыва пламени через неплотности (кадр 515, соответствующий моменту времени 532,0 мс после воспламенения смеси в камере),

[3] ГОСТ Р 56289–2014. Конструкции светопрозрачные легкосбрасываемые для зданий. Методы испытаний на воздействие внутреннего аварийного взрыва.

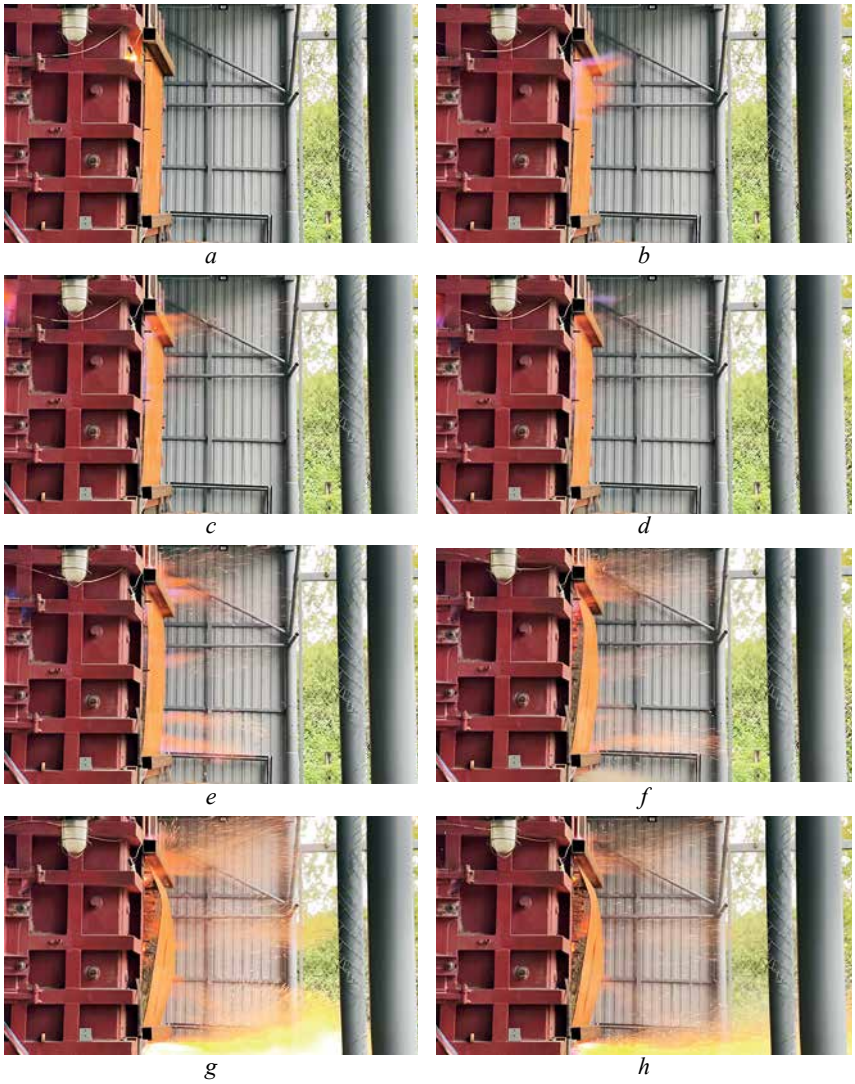


Рис. 1. Процесс взрыва пропановоздушной смеси в камере (эксперимент 1) в разные моменты времени: *a* — кадр 210,0 мс, соответствует точке *1* на рис. 2; *b* — кадр 300, 576,9 мс, соответствует точке *2* рис. 2; *c* — кадр 310, 641,0 мс; *d* — кадр 320, 705,1 мс; *e* — кадр 330, 769,2 мс, соответствует точке *3* на рис. 2; *f* — кадр 340, 833,3 мс, соответствует точке *4* рис. 2; *g* — кадр 350, 897,4 мс; *h* — кадр 360, 961,5 мс, соответствует точке *5* на рис. 2

Fig. 1. Process of propane-air mixture explosion in the chamber (experiment 1) at different moments of time: *a* — frame 210.0 ms, corresponding to point *1* in Fig. 2; *b* — frame 300, 576.9 ms, corresponding to point *2* in Fig. 2; *c* — frame 310, 641.0 ms; *d* — frame 320, 705.1 ms; *e* — frame 330, 769.2 ms, corresponding to point *3* in Fig. 2; *f* — frame 340, 833.3 ms, corresponding to point *4* in Fig. 2; *g* — frame 350, 897.4 ms; *h* — frame 360, 961.5 ms, corresponding to point *5* in Fig. 2

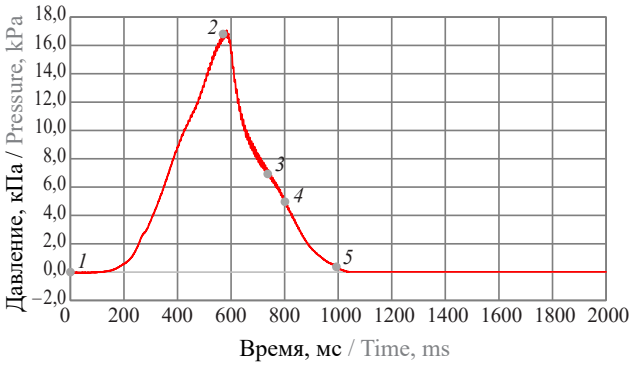


Рис. 2. Зависимость давления взрыва от времени испытания в камере (эксперимент 1)

Fig. 2. Dependence of explosion pressure on chamber test time (experiment 1)

имеющиеся по периметру закрепленной панели. На рис. 3, *c*–*h* приведены снимки процесса через каждые 10 кадров или каждые 64,1 мс.

Среднее значение взрывного давления, полученное путем осреднения показаний трех датчиков давления, установленных на гранях камеры, приведено на рис. 4.

На рис. 4 отмечены моменты времени (точки *1*–*5*), которым соответствуют мгновенные снимки на рис. 3, *a*–3, *d* и 3, *g*.

Точка *2* на рис. 4 соответствует времени 532,0 мс после начала взрывного горения смеси (кадр 515, см. рис. 3, *b*). Давление взрыва в этот момент времени составляло 18,0 кПа. Из рис. 3, *b* видно, что

Рис. 3. Процесс взрыва пропановоздушной смеси в камере (эксперимента 2) в разные моменты времени: *a* — кадр 432,0 мс, соответствует точке *1* на рис. 4; *b* — кадр 515, 532,0 мс, соответствует точке *2* на рис. 4; *c* — кадр 525, 596,1 мс, соответствует точке *3* на рис. 4; *d* — кадр 535, 660,2 мс, соответствует точке *4* на рис. 4; *e* — кадр 545, 724,3 мс; *f* — кадр 555, 788,4 мс; *g* — кадр 565, 852,5 мс, соответствует точке *5* на рис. 4; *h* — кадр 575, 916,6 мс

Fig. 3. Process of explosion of propane-air mixture in the chamber (experiment 2) at different moments of time: *a* — frame 432.0 ms, corresponds to point *1* in Fig. 4; *b* — frame 515, 532.0 ms, corresponds to point *2* in Fig. 4; *c* — frame 525, 596.1 ms, corresponds to point *3* in Fig. 4; *d* — frame 535, 660.2 ms, corresponds to point *4* in Fig. 4; *e* — frame 545, 724.3 ms; *f* — frame 555, 788.4 ms; *g* — frame 565, 852.5 ms, corresponds to point *5* in Fig. 4; *h* — frame 575, 916.6 ms

этот момент характеризуется началом истечения (прорывом) продуктов взрыва (взрывного горения) через неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели (в данном случае прорыв газов происходит в верхней части ее крепления). При этом давлении начинается смещение (деформация) панели, как и в эксперименте 1.

В эксперименте 2 (в отличие от эксперимента 1) происходит дальнейший значительный прирост избыточного давления. Сброс продуктов взрыва через образующиеся в результате деформации панели сбросные проемы (щели) не может компенсировать их приток, что приводит к дальнейшему росту давления в камере. Однако вскрытие проемов за счет деформации панели несколько снизило темп роста давления, что выразилось в образовании «полки» давления вблизи точки *2*. На рис. 3, *c* показан момент времени (точка 3), когда сброс газов через вскрывающиеся проемы сравнивается с притоком продуктов взрыва, поэтому возникает максимум давления взрыва (точка *4* на рис. 3, *d*; давление 48 кПа). В дальнейшем происходит резкое снижение давления, так как площадь освобождаемого проема растет, а темп притока продуктов взрыва падает. На рис. 3, *g* (точка *5* на рис. 4) показан завершающий этап, на котором давление взрыва составляет около 2 кПа. В этот момент наблюдается истечение остатков продуктов взрыва и продолжается движе-

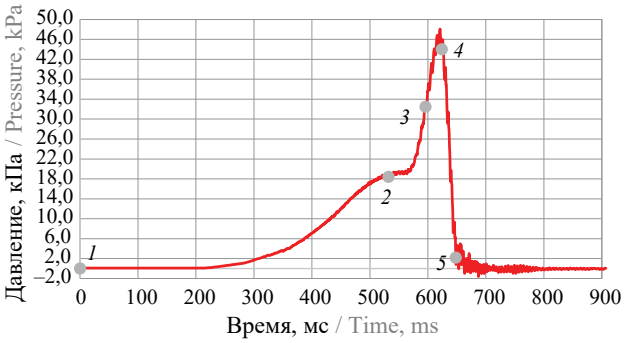


Рис. 4. Зависимость давления взрыва от времени испытания в камере (эксперимент 2)
Fig. 4. Dependence of explosion pressure on chamber test time (experiment 2)

ние панели, сломанной под действием взрывной нагрузки в точке *4*.

Выводы

Анализ результатов исследования, направленного на определение устойчивости сборной металлической конструкции, состоящей из стеновых сэндвич-панелей и металлического каркаса, к взрывным нагрузкам, показал, что при защемлении панелей только с двух противоположных сторон наблюдается их значительная деформация с остаточным прогибом при избыточном давлении взрыва 17–18 кПа. Экспериментами установлено, что продолжительность воздействия взрывной нагрузки (нарастание от нуля до 17–18 кПа) должна составлять не менее 250–300 мс. В результате деформации панелей образуются отверстия (щели), через которые поступают газы, содержащиеся в волне сжатия, деформирующей панель. В случае формирования волны сжатия при внешнем аварийном взрыве это будет поток воздуха. Полное разрушение конструкции наблюдалось при интенсивности динамического воздействия во взрывной волне 45–47 кПа. Время воздействия взрывной нагрузки на конструкцию до ее разрушения (излома) составляло около 400 мс [7, 17–20].

Данная сборная металлическая конструкция может быть использована в качестве взрывоустойчивого защитного ограждения на производственных объектах при расчете взрывных нагрузок. Предложено несколько вариантов увеличения устойчивости конструкции к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси: уменьшение межосевого расстояния между трубами металлического каркаса и дополнительное крепление панели по ее протяженным сторонам. Эти меры могут обеспечить увеличение ее несущей способности по отношению к взрывным нагрузкам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Xia Z., Wang X., Fan H., Li Y., Jin F.* Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels // International Journal of Impact Engineering. 2016. Vol. 97. Pp. 10–28. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.001
2. *Ahmed S., Galal K.* Effectiveness of FRP sandwich panels for blast resistance // Composite Structures. 2017. Vol. 163. Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.066
3. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. … д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 492 с.
4. *Bradly D.* Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations. Molkov V.V. (ed.). Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. Pp. 51–59.
5. *Solberg D.M.* Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.
6. *Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M.* Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers // Fire Safety Journal. 2005. Vol. 40. Issue 4. Pp. 307–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
7. *Громов Н.В., Корольченко А.Д.* Испытания сэндвич-панелей на взрывоустойчивость // Новые технологии и перспективы развития во взрывной отрасли : тезисы докл. первой науч.-практ. конф. Уфа, 2022. С. 20–22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850
8. *Максакова А.В.* Исследование нормативной документации на тему легкосбрасываемой конструкции и предложение по его изменению // Молодежные инновации : сб. мат. семинара мол. уч. в рамках XXIII Междунар. науч. конф. М., 2020. С. 144–147. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850
9. *Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S.* Effect of instabilities and acoustics on pressure generated in vented propane-air explosions // 22nd ICDERS July 27–31, 2009. Minsk, Belarus. 2009. URL: http://www.icders.org/ICDERS2009/abstracts/ICDERS2009-0058.pdf
10. *Gorev V.A.* Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. P. 012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
11. *Пилюгин Л.П.* Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.
12. *Шлег А.М.* Определение параметров легкосбрасываемых конструкций : дис. … канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2002. 201 с.

13. *Поландов Ю.К., Корольченко Д.А., Евич А.А.* Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
14. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
15. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* Dynamic effects at internal deflagration explosions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 603. Issue 5. P. 052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
16. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Фан Т.А.* Особенности определения коэффициента динамичности при импульсных нагрузках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 37–43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43
17. *Polandov Iu., Korolchenko D.* The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 01040. DOI: 10.1051/matecconf/201710601040
18. *Громов Н.В.* Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газо-паровоздушных смесей : дис. … канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.
19. *Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г.* Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // Промышленное строительство. 1969. № 6. С. 19–22.
20. *Yankelevsky D., Kochetkov A.V., Feldgun V.R., Karinski Y.S.* A simplified model for explosion venting due to the separation of a heavy protective cover // International Journal of Protective Structures. 2012. Vol. 3. Issue 1. Pp. 81–103. DOI: 10.1260/2041-4196.3.1.81

REFERENCES

1. Xia Z., Wang X., Fan H., Li Y., Jin F. Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 2016; 97:10-28. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.001
2. Ahmed S., Galal K. Effectiveness of FRP sandwich panels for blast resistance. *Composite Structures.* 2017; 163:454-464. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.066
3. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).
4. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions. *Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*. Molkov V.V. (ed.). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
5. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
6. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M. Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers. *Fire Safety Journal*. 2005; 40(4):307-319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
7. Gromov N.V., Korolchenko A.D. Testing of sandwich panels for explosion resistance. *New technologies and development prospects in the explosive industry : abstracts of the first scientific and practical conference*. Ufa, 2022; 20-22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850 (rus).
8. Maksakova A.V. A study of regulatory documentation on the topic of a lightweight structure and a proposal to change it. *Youth Innovations : a collection of materials of the seminar of young scientists in the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow, 2020; 144-147. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850 (rus).
9. Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of instabilities and acoustics on pressure generated in vented propane-air explosions. *22nd ICDERS July 27–31, 2009 Minsk, Belarus*. URL: http://www.icders.org/ICDERS2009/abstracts/ICDERS2009-0058.pdf
10. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion. *Journal of Physics : Conference Series*. 2020; 1425:012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
11. Pilyugin L.P. *Ensuring the explosion resistance of buildings with the help of safety structures*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 224. (rus).
12. Shleg A.M. *Determination of the parameters of easily dropped structures : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2002; 201. (rus).
13. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).

14. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
15. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. Dynamic effects at internal deflagration explosions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 603(5):052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
16. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Phan T.A. Features of determination of the dynamic amplification factor under impulse loads. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):37-43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43 (rus).
17. Polandov I., Korolchenko D. The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:01040. DOI: 10.1051/matecconf/201710601040.
18. Gromov N.V. *Improvement of the technical system for ensuring the explosion resistance of buildings during explosions of gas-air mixtures : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2007; 134. (rus).
19. Strel`chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of blast structures in buildings of explosive industries. *Industrial Construction*. 1969; 6:19-22. (rus).
20. Yankelevsky D., Kochetkov A.V., Feldgun V.R., Karinski Y.S. A simplified model for explosion venting due to the separation of a heavy protective cover. *International Journal of Protective Structures.* 2012; 3(1):81-103. DOI: 10.1260/2041-4196.3.1.81

Поступила 03.05.2023, после доработки 23.05.2023;
принята к публикации 01.06.2023
Received May 3, 2023; Received in revised form May 23, 2023;
Accepted June 1, 2023

Информация об авторе

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний лаборатории газодинамики и взрыва, Институт комплексной безопасности в строительстве (ИКБС); преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru

Information about the author

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Laboratory of Gas Dynamics and Explosion, Institute of Integrated Safety in Construction; Lecturer of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 17–30
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):17-30

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.343.7

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30

Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести

Иван Ардашевич Болодьян[1], Леонид Петрович Вогман[1], Дмитрий Александрович Корольченко[2] ✉

[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] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В различных отраслях народного хозяйства применяется герметичное оборудование (далее — гермокамера), в котором используется обогащенная кислородом атмосфера (в ряде случаев в условиях с изменяющимся давлением). Показано, что главной причиной пожаров в гермокамерах являлось нерегламентированное применение изделий электрооборудования, а также горючих веществ и материалов на основе органических соединений, входящих в состав применяемых в гермокамерах материалов.

Цель. Поиск способов снижения горючести материалов, применяемых в гермокамерах, и исследование параметров пожарной опасности гермокамер с повышенным содержанием кислорода и повышенным давлением.

Задачи. Определение граничных условий применения материалов при повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, анализ результатов экспериментальных исследований горючести материалов, применяемых в гермокамерах.

Методы исследования. Исследование характеристик процесса горения неметаллических материалов при повышенном давлении проводили на оригинальной установке, представляющей собой сосуд из нержавеющей стали высотой 750 мм и внутренним диаметром 155 мм. Для зажигания образца использовали спираль из нихромовой проволоки. Давление фиксировали при помощи манометра.

Результаты и их обсуждение. В результате экспериментальных исследований пожарной опасности строительных и конструкционных материалов в обогащенных кислородом средах и при повышенном давлении были определены пути повышения предельной концентрации кислорода (ПКК) и снижения горючести материалов: применение теплоотводящей поверхности, негорючей оболочки; введение ингибиторов в их состав и структуру; поверхностная обработка различными огнезащитными составами и пропитками. При исследованиях параметров пожарной опасности (скорость распространения пламени, теплота сгорания, температура самовоспламенения) материалов в условиях изменения состава азотно-кислородной атмосферы и давления получено, что при повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается.

Выводы. Установлено, что предельная концентрация кислорода зависит от геометрических размеров образца, а также от скорости газового потока. При повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается. Наличие теплоотводящей поверхности также ведет к повышению ПКК, которая возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, характерно снижение значения ПКК при увеличении в макромолекуле полимера количества атомов водорода.

Ключевые слова: конструкционный материал; азотно-кислородный поток; пожарная опасность строительных материалов; токсичность продуктов горения; горение полимеров

Для цитирования: *Болодьян И.А., Вогман Л.П., Корольченко Д.А.* Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 17–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30

✉ *Корольченко Дмитрий Александрович,* e-mail: ikbs@mgsu.ru

© И.А. Болодьян, Л.П. Вогман, Д.А. Корольченко, 2023

Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability

Ivan A. Bolodyan[1], Leonid P. Vogman[1], Dmitriy A. Korolchenko[2] ✉

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

[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Sealed equipment (hereinafter referred to as hermetic chambers) is used in various branches of economy. Atmospheres enriched with oxygen (in some cases under variable pressure conditions) are used. It was shown that the main reason of the fires in the pressurized chambers was the unregulated use of the electrical equipment, as well as combustible substances and materials on the basis of organic compounds included in the materials used in the pressurized chambers.

Objective. To find ways to decrease combustibility of materials used in pressurized chambers and to study fire risk parameters of pressurized chambers with high oxygen content and increased pressure.

Objectives. To determine the boundary conditions of applying materials with increased values of temperature, oxygen content and pressure and analyze the results of experimental studies of combustibility of materials used in sealed chambers.

Research methods. Investigation of the characteristics of the combustion process of non-metallic materials under increased pressure was carried out on an original setup represented by a stainless steel vessel with a height of 750 mm and an inner diameter of 155 mm. A spiral of nichrome wire was used to ignite the sample. The pressure was fixed with a manometer.

Results and their discussion. As a result of experimental research of fire hazard of construction and construction materials in oxygen-enriched media and under increased pressure the ways of increasing the oxygen concentration limit (OCL) and reduction of combustibility of materials were determined: application of heat-removing surface, incombustible shell; putting inhibitors in their composition and structure; surface treatment with different fire protective compositions and impregnations. When studying the parameters of fire hazard (flame propagation velocity, heat of combustion, autoignition temperature) of materials under the conditions of changes in the composition of nitrogen-oxygen atmosphere and pressure, it was found that the OCL for all materials decreases at higher pressures.

Conclusions. It is found that the limiting oxygen concentration depends on the geometrical dimensions of the sample, as well as on the speed of the gas flow. At higher pressures the OCL for all the materials decreases. The presence of a heat-removing surface also leads to higher OCL, which increases with increasing substrate thickness and decreasing thickness of the material on it. For materials not containing substances that inhibit the combustion reaction, a decrease in the LOC value with an increase in the number of hydrogen atoms in the polymer macromolecule is characteristic.

Keywords: construction material; nitrogen-oxygen flow; fire hazard of construction materials; toxicity of combustion products; polymer combustion

For citation: Bolodyan I.A., Vogman L.P., Korolchenko D.A. Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):17-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30 (rus).

✉ *Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko*, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Введение

В различных отраслях народного хозяйства (медицина, космическая, авиационная и глубоководная техника) применяется герметичное оборудование (далее — гермокамера), в котором используется обогащенная кислородом атмосфера (в ряде случаев в условиях с изменяющимся давлением). Содержание кислорода в атмосфере гермокамер может достигать 25 % об. и более, а давление — 0,1 МПа и более.

Анализ случаев аварий в процессе освоения гермокамер на ранней стадии показал [1–3], что главными причинами пожаров являлось нерегламентированное применение изделий электрооборудования, а также горючих веществ и материалов на основе органических соединений, входящих в состав одежды, расходных материалов, конструкций, применяемых в гермокамерах. Большой статистический материал по пожарам на обитаемых космических летательных аппаратах, а также в гермокамерах на испытательных стендах и модулях представлен в [4–6]. В настоящее время количество аварий на объектах защиты, в эксплуатации которых находятся гермокамеры, снизилось. Тем не менее остается актуальным изучение процессов горения и тушения пожаров в условиях повышенного содержания кислорода и давления

в таких важных отраслях народного хозяйства, как медицина, космонавтика и др. В то же время является очевидным тот факт, что процессы горения веществ и материалов в атмосфере с повышенным содержанием кислорода протекают более активно, чем в воздушной среде. Например, для сравнения, температура пламени при горении метана на воздухе достигает 1900 °С, а в кислороде — 2700 °С. Еще более высокие температуры отмечаются в результате сгорания в чистом кислороде водорода (более 2800 °С) и ацетилена (более 3000 °С). Отсюда следует, что повышение пожарной опасности веществ и материалов в среде с содержанием кислорода выше 21 % об. нельзя не учитывать при разработке мер по обеспечению пожарной безопасности и противопожарной защиты объектов, на которых эксплуатируются гермокамеры.

К опасным факторам возникновения и развития пожара в гермокамере можно отнести:

- электрические разряды и проводники, нагретые при токовых нагрузках, в результате чего происходит воспламенение горючих материалов;
- атмосфера, отличная от воздушной, в которой содержание кислорода превышает 21 % об.;
- токсичные продукты горения, образующиеся при окислительной реакции горения полимерных (искусственных и природных) веществ, материалов и конструкционных изделий, например одежды, расходных медицинских материалов, термореактивных и термопластичных пластмасс;
- повышенные температура и давление в штатном режиме эксплуатации и при аварии;
- разрушение узлов, изделий и в целом оборудования.

Исходя из пожарной опасности гермокамер, необходимости предотвращения пожара и недопустимости сверхнормативных пожарных рисков, исследования по обеспечению пожарной безопасности этого оборудования проводятся в следующих направлениях:

- исследование в обогащенных кислородом средах параметров горения различных материалов в целях создания полимеров с высокими предельными характеристиками по горючести и выбора наименее горючих из них;
- изучение закономерностей воспламенения материалов гермокамер от электрических разрядов, от нагревания при токовых перегрузках и от других воздействий;
- исследование закономерностей развития (скорость распространения пламени, тепловыделение при горении, время достижения предельно допустимых значений температуры и давления) и закономерностей процессов тушения пожаров в рабочем диапазоне параметров атмосферы (выбор наиболее эффективных огнетушащих веществ (ОТВ), средств обнаружения и тушения, способов подачи ОТВ).

Цель работы заключается в поиске способов снижения горючести материалов и исследовании параметров пожарной опасности в условиях гермокамер с повышенным содержанием кислорода и повышенным давлением.

Задачами исследований являлись определение граничных условий применения материалов при повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, анализ результатов экспериментальных исследований горючести материалов, применяемых в гермокамерах.

Методы исследований

Исследования пожарной опасности фрагментов кабелей, формируемых из проводников с полиэтиленовой изоляцией с использованием покрытий из термостойких материалов, проводились по следующей методике. В качестве образцов применялись отрезки жгутов проводников длиной 250 мм сечением 0,35–1,50 мм^2 с количеством жил от 4 до 20 при диаметре фрагмента 4–12 мм. Жгут формировали либо путем обмотки лентой с перекрытием или без перекрытия, либо с помощью чехла из полиимидной пленки в два слоя с фиксацией его тканью из волокна аримид-Т или стекловолокна с последующей обмоткой лентой или тканью.

Исследование временных характеристик процесса горения неметаллических материалов при повышенном давлении проводят обычно в сосуде, объем которого рассчитывают на условиях отсутствия влияния на процесс коэффициента избытка окислителя и накопления продуктов горения. Расчеты показывают, что для исследования горения образцов материалов, наиболее широко используемых в барокамерах (хлопчатобумажные ткани) площадью около 0,05 м^2, необходим сосуд вместимостью более 0,3 м^3. Проведение экспериментов на таких установках при повышенных давлениях весьма трудоемко, а их устройство сложно. Создание внутри таких сосудов хорошо перемешанных смесей с точно заданным содержанием окислителя требует больших затрат времени. Влияние расходования кислорода на процесс горения материалов может быть исключено путем проведения опытов в потоке, имеющем скорость не менее 0,15 м/с, поскольку при скорости 0,15–1,50 м/с поток слабо влияет на среднеквадратичную (по направлению горения) скорость распространения пламени. Как показывают специальные измерения, скорость вентиляционных потоков в гермокамерах составляет 0,10–0,25 м/с, поэтому можно проводить эксперименты при скорости среды около образца 0,20–0,25 м/с.

С учетом этого была разработана экспериментальная установка для исследования скорости и площади сгорания материала в среде с различным содержанием кислорода при давлении до 0,7 МПа.

В качестве рабочей емкости использовали цилиндрический сосуд из нержавеющей стали высотой 750 мм и внутренним диаметром 155 мм. Сосуд снабжен окном размером 350 × 120 мм для наблюдения за горением образца материала и киносъемки процесса горения. Окно состоит из двух частей: внешней, силовой, из органического стекла толщиной 35 мм и внутренней, защитной, из тонкого неорганического стекла.

Образец размером 350 × 140 мм натягивали на рамку из нержавеющей стали. На поверхность образца наносили две взаимно перпендикулярные линии, проведенные через точку зажигания с метками через 1 см. Рамку закрепляли на верхнем фланце сосуда, через который выведено шесть электроизолированных электродов. Рамку и образец устанавливали вертикально параллельно плоскости окна. Образец освещался четырьмя электрическими лампами, установленными внутри сосуда.

Для зажигания образца использовали спираль из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм, прикрепляемую перед опытом к образцу на расстоянии 60 мм от его нижнего края. Напряжение, необходимое для нагрева спирали, подавалось от лабораторного трансформатора.

Для создания в сосуде газового потока использовали смесительное устройство, обеспечивающее подачу смеси с заданной концентрацией кислорода с точностью 0,5 % при давлении до 0,7 МПа и расходах до $5 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Диапазон изменения давления среды в экспериментах составлял 0,1–0,8 МПа. Концентрация кислорода в рабочей смеси N_2–O_2 изменялась в пределах 21–28 % об. Газовая смесь подавалась в нижнюю часть сосуда, где для создания по его сечению равномерного потока были установлены три латунные сетки.

Давление в сосуде измерялось образцовым манометром с пределом измерения до 1 МПа. Газовая смесь при выходе из сосуда очищалась от твердых продуктов горения в фильтре, охлаждалась и через вентиль, используемый для регулирования давления в сосуде, выбрасывалась в вентиляционную систему.

Обсуждение результатов исследований

Процессы горения материалов в обогащенных кислородом средах при повышенных давлениях. Разработка материалов пониженной горючести

Задачами исследования являлись определение граничных условий применения материалов при повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, а также создание материалов пониженной горючести.

Для определения способности материалов к горению в средах с различным содержанием кислорода обычно используется предельная концентрация кислорода (ПКК) $C_{пр}$ (% об.), при превышении которой возможно горение материала [4].

Испытания проводят при зажигании образца как сверху, так и снизу в азотно-кислородной атмосфере с точностью содержания кислорода до 0,1 % об. Чем выше содержание кислорода в азотно-кислородной смеси, при котором образец не горит, тем менее горючим является образец.

Изучение зависимости ПКК от факторов, характеризующих условия применения материалов, позволяет оценить пожарную опасность при их использовании и выявить конструктивные приемы по ее снижению. С этой целью проводились экспериментальные исследования ПКК в зависимости от давления среды, наличия теплоотводящих поверхностей, негорючей защитной оболочки материала и введения в состав полимерной композиции ингибиторов, содержащих азот, хлор и фосфор.

Предварительные исследования показали, что величина $C_{пр}$ слабо зависит от геометрических размеров образца (существенное снижение данного показателя наблюдалось при толщине материала менее 2–3 мм), а также от скорости газового потока.

Исследования влияния давления среды на ПКК показали, что в диапазоне давлений от 0,05 до 0,15 МПа эта характеристика изменяется незначительно. При значениях ниже 0,05 МПа наблюдается резкое повышение ПКК, что обусловлено наличием предельного давления [7–10].

Наличие теплоотводящей поверхности ведет к повышению ПКК. При этом определялась зависимость ПКК от толщины металлической подложки и толщины материала на ней. Установлено, что она возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Это объясняется тем, что при горении в материале и подложке устанавливается градиент температур, который и определяет величину ПКК. Следовательно, добиваясь плотного контакта подложки с материалом и уменьшения толщины материала (например, лакокрасочных покрытий), можно повысить предельную концентрацию кислорода.

Увеличение ПКК можно обеспечить также применением негорючей оболочки материала, например из стеклоткани. Оболочка из стеклоткани играет роль диффузионного и теплового экрана, уменьшая тепловой поток из зоны горения к поверхности материала и препятствуя диффузии продуктов окисления от поверхности в зону горения.

Одним из способов снижения горючести проводников в составе кабельных сетей с полиэтиленовой изоляцией, отличающейся экономичностью, малой токсичностью, отсутствием хладотекучести, является экранирование проводников чехлом из термостойкого негорючего материала. Пожарная безопасность таких кабелей не обеспечивается применением однослойного покрытия из негорючего материала, формируемого путем обмотки лентой или тканью, и требует разработки специальной конструктивной защиты при использовании их в составе кабельных жгутов в обогащенных кислородом средах. Воздействие источника нагревания в виде пламени или раскаленной от токовой перегрузки жилы приводит к образованию расплава из материала изоляции проводников, просачиванию его через покрытие и интенсивному горению кабеля. Результаты исследования пожарной опасности фрагментов кабелей из проводников с полиэтиленовой изоляцией из термостойких материалов приведены в работе [11].

Большинство материалов, составляющих фрагменты кабеля, являются горючими. Наименьшей горючестью из исследованных фрагментов обладает кабель с покрытием в виде сплошного чехла из полиимидной пленки в два слоя и наружного чехла из волокон аримида-Т или стеклоткани. Для этого состава покрытия значение $C_{пр}$ составило 46 %. Эти данные были получены в ходе исследований на способность к воспламенению различных фрагментов кабелей под действием накаленных токовой перегрузкой жил кабеля путем варьирования числа одновременно нагруженных жил (при уменьшении их количества способность кабеля к воспламенению снижалась). По результатам выполненной работы можно заключить, что в качестве пожаробезопасного покрытия кабельных жгутов из проводников с изоляцией на основе полиэтилена для применения в атмосфере, обогащенной кислородом до 40 %, может быть использована комбинация сплошного чехла из полиимидной пленки в два слоя и наружного чехла из волокон аримида-Т или стеклоткани.

В целях создания материалов с высокой предельной концентрацией кислорода проводились исследования влияния на ПКК химического состава и структуры материалов. Установлено, что для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, наблюдается снижение ПКК с увеличением в макромолекуле полимера количества атомов водорода. Иное влияние на предельную концентрацию кислорода оказывает углерод в составе полимерного материала. Результаты опытов показали, что более карбонизированные композиции материала имеют и более высокие значения ПКК, что обусловлено теплопотерями излучением из зоны горения, которые составляют около 75 % от общего тепловыделения.

Влияние на величину ПКК содержания в составе материала инертных наполнителей определяли на модельных композициях, включающих эпоксидную смолу и кварцевый песок в различных соотношениях. Опыты показали, что существенное повышение ПКК наблюдается лишь для материалов, содержащих значительное количество (80–90 % масс.) инертного наполнителя. Для искусственных кож, имеющих в составе несколько компонентов, горючесть определяется наиболее горючим из них.

Большой интерес представляют экспериментальные исследования обработки материалов различными огнезащитными пропитками [12–14], которые проводились при атмосферном давлении. Результаты исследований представлены в таблице и на рис. 1.

Из данных таблицы видно, что образцы хлопчатобумажной (ХБ), хлопколавсановой и вискозно-лавсановой тканей имеют $C_{пр}$ = 14–15 %. Обработка ХБ ткани антипиреном «Пироватекс» повышает значение $C_{пр}$ до 23 %. Такая же величина получена и для хлопколавсановой ткани, в состав которой введена фосфоразотсодержащая добавка. Еще более высокое значение $C_{пр}$ имеет вискозно-лавсановая ткань, обработанная этим же препаратом, а также ХБ ткань, пропитанная антипиреновой добавкой «МС». Заметно больший огнезащитный эффект наблюдается для ХБ ткани с добавкой фосфор-

Предельная концентрация кислорода $C_{пр}$ при обработке материалов огнезащитными покрытиями
The maximum oxygen concentration C_{lim} during the processing of materials with fire-resistant coatings

Состав ткани Fabric composition	Огнезащитное покрытие Fireproof coating	$C_{пр}$, % C_{lim}, %
Хлопчатобумажная Cotton	–	14
	Пироватекс / Pirovatex	23
	МС / MS	25
	ОП / OP	32
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphorus-containing impregnation	31
Хлопок (67 % масс.) + лавсан (33 % масс.) Cotton (67 % wt.) + lavsan (33 % wt.)	–	15
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphate impregnation	23
Вискоза (67 % масс.) + лавсан (33 % масс.) Viscose (67 % wt.) + lavsan (33 % wt.)	–	15
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphorus impregnation	25

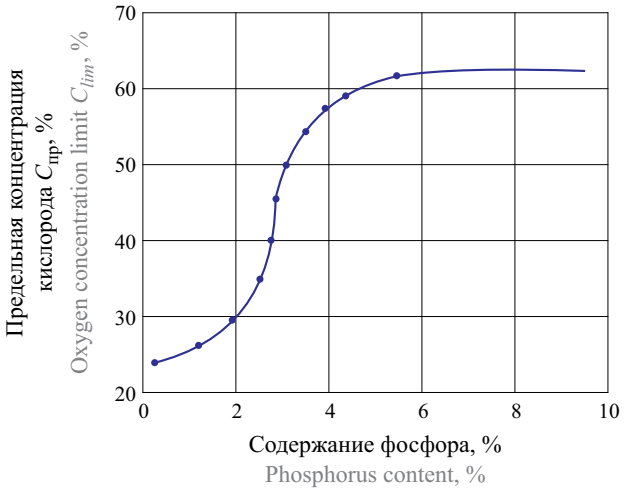


Рис. 1. Зависимость предельной концентрации кислорода от содержания фосфора в ткани, обработанной фосфорной кислотой

Fig. 1. Dependence of the oxygen concentration limit on the phosphorus content in the tissue treated with phosphoric acid

азотсодержащей композиции и антипирена «ОП». В этом случае предельная концентрация кислорода достигает 31–32 %.

На рис. 1 представлены результаты исследований влияния антипиренов на ткани из волокон на основе ароматического полиамида, обработанные фосфорной кислотой. Эксперименты показали, что величина $C_{пр}$ для этих тканей существенно повышается и при содержании фосфора в ткани 5–6 % масс. достигает 60 %.

Исследования текстильных материалов с заданными эксплуатационными свойствами показали, что способность к горению комбинированных тканей различного состава и структуры зависит от характера распределения волокон в материале, а также от физико-химических свойств входящих в комбинированную ткань компонентов. Наиболее высокие значения ПКК получены, например, для модельных комбинированных тканей, состоящих из карбимида, покрытого одним или несколькими слоями аримида-Т. Покрытие тканью из аримида-Т таких тканей, как лавсан и капрон, образующих при горении расплав, а также ХБ ткани, способной к тлению в этих условиях, не оказывает защитного действия при горении.

Исследования по понижению горючести блочных строительных композиций (на примере пенополиуретана — ППУ), применяемых в качестве теплоизоляционных материалов, проводились с применением галоген- и фосфорсодержащих ингибиторов [8]. С помощью фосфора и брома, химически связанных с макромолекулой ППУ, удалось существенно снизить горючесть материала и повысить ПКК, которая зависит от соотношения в материале количества фосфора и брома. Так, в образцах, содержащих около 4,3 % брома, с увеличением количества фосфора с 0,5 до 2,5 % наблюдалось повышение уровня $C_{пр}$ с 21 до 26 %. Предложен состав ППУ, содержащий 1,5 % фосфора и 4 % брома. Следует заметить, что с повышением в структуре ППУ содержания брома происходит дальнейшее снижение горючести композиции.

Результаты испытаний показали, что галоген- и фосфорсодержащие соединения эффективно снижают горючесть ППУ. Одним из преимуществ таких ингибиторов по сравнению с добавками, такими как пластификаторы, является то, что они не влияют на физико-механические свойства пенопласта. Кроме того, они повышают стабильность огнезащитных свойств во времени и не диффундируют из материала в процессе его эксплуатации. Их влияние на снижение горючести пенопласта основано на образовании при пиролизе полимера оксидов и кислот фосфора, которые действуют как гидрофобное средство, увеличивая выход карбонизированного остатка [15–18]. Это подтверждают опыты: фосфор- и бромсодержащие ППУ после испытаний в калориметре имеют остаток 30–40 % масс., в то время как исходная композиция дает остаток ~10 % масс. Карбонизированный слой приводит к снижению выхода при пиролизе летучих легковоспламеняющихся веществ. Образующийся углеродный каркас физически защищает нижележащие слои пенопласта, снижая горючесть материала. Галогены в составе полимера усиливают этот процесс, так как участвуют в ингибировании горения в газовой фазе [19].

При повышенных давлениях, как показали экспериментальные исследования, ПКК для всех материалов снижается в различной степени. Например, для ХБ ткани с фосфоразотсодержащей пропиткой в диапазоне давлений 0,1–0,8 МПа $C_{пр}$ снижается с 31 до 17 %, для той же ткани с пропиткой «ОП» — с 32 до 18 %. Высокие значения ПКК при атмосферном давлении можно объяснить преобладанием в этих условиях потерь тепла излучением, поскольку с повышением давления роль излучения существенно снижается.

Понижение горючести композиционных материалов (на примере стеклопластиков) может быть обеспечено использованием соединений ряда фосфазенов [20, 21]. Основными компонентами этих материалов являются наполнитель и связующее. В зависимости от природы наполнителя, обладающего низкой горючестью, который используется при создании композита, получают органо-, угле- и стеклопластики. Поэтому горючесть композиционных материалов определяется в основном горючестью связующего, и ее снижения добиваются введением в состав различных антипиренов. Использование

галогенфосфазеновых соединений в качестве антипиренов обусловлено наличием в молекуле таких элементов, как фосфор, азот, галоген. Наиболее эффективными замедлителями горения являются такие фосфоразотсодержащие вещества, в молекуле которых массовое соотношение атомов азота и фосфора меньше 1. Из фосфазенов, в которых на один атом азота приходится один атом фосфора, получают наиболее эффективные антипирены в составе композиционных материалов и, соответственно, наиболее высокие значения ПКК.

Показатели пожарной опасности материалов. Зависимость площади выгорания материалов от скорости распространения пламени

Из характеристик неметаллических органических материалов (например, текстильных, искусственных материалов, наиболее часто используемых в гермокамерах), которые определяют их пожарную опасность, наиболее важной является скорость распространения пламени u_n, см/с, характеризующая динамику развития процесса горения.

Были проведены исследования тканей («Лола», вниивлон, тулен, огнезащищенная и неогнезащищенная ХБ ткань, хлопок, карбимид, фенилон, аримид-Т, терлон, сульфон-Т) с различным химическим составом, разной способностью и характером горения [22]. Образцы толщиной 50–200 мм испытывали при атмосферном давлении в среде с различным содержанием кислорода, осуществляя их горение сверху вниз. ПКК для этих тканей изменялся от 18 до 66 %. Различие в характере горения тканей заключалось в том, что для одних из них (например, «Лола», вниивлон, тулен, огнезащищенная ХБ ткань) реализовывался гетерогенный режим, при котором горение в виде тления протекает практически без пламени. Для этих тканей характерно низкое значение u_n и достаточно высокая ПКК, составляющая 43–66 %. Для других тканей (хлопок неогнезащищенный, карбимид, сульфон-Т и др.), горение которых происходит в газовой фазе пламенем значительных размеров, ПКК существенно ниже и изменяется от 18 до 30 %.

При росте давления и содержания кислорода в замкнутом пространстве увеличивается скорость распространения пламени u_n, одновременно возрастают скорости выделения тепла и продуктов горения. Экспериментально определялись зависимости пройденного пламенем пути в различных направлениях относительно точки зажигания от ориентации плоскости материала, направления и скорости вынужденного (обогащенного кислородом) газового потока, площади выгорания материала во времени [23].

Исследования показали, что в диапазоне скоростей вынужденного газового потока от 0 до 1,5 м/с величина u_n зависит в основном от свойств материала (его вида, структуры, горючести, направления движения фронта пламени) и газодинамических условий, регламентируемых взаимодействием вынужденной и естественной конвекции: с ростом скорости вынужденного потока увеличивается и скорость распространения пламени u_n.

Определение зависимости u_n от давления газовой среды P и содержания в ней кислорода $C_{ок}$ показало, что скорость горения возрастает с ростом давления и содержания кислорода для всех направлений горения (рис. 2 и 3). При этом одновременно сокращается время выгорания определенной площади материала. Практически для всех исследованных материалов определена зависимость площади выгорания S от времени τ на участке установившегося развитого процесса горения ткани, которая аппроксимируется выражением:

$$S = k\tau^n, \qquad (1)$$

где k — коэффициент, значение которого зависит от плотности материала, а также параметров состояния среды (давление, содержание кислорода) и может быть принято из [23]; $n = 2{,}27–3{,}84$.

Особенно сильная зависимость $u_n = f(P)$ наблюдается для случая горения образца вверх. Это можно объяснить тем, что в условиях плотной среды влияние подъемных сил и естественной конвекции на процесс распространения пламени возрастает. Как уже отмечалось, скорость распространения

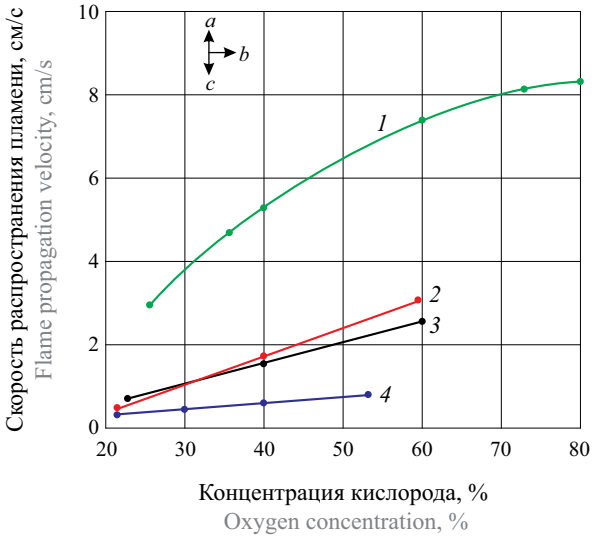


Рис. 2. Зависимость скорости распространения пламени от концентрации кислорода в смеси и направления горения: *1–3* — полотно капроновое (артикул 56003) в направлении, соответственно, *a*, *b* и *c*; *4* — провод полиэтиленовый МПКМУ в направлении *a* (диаметр 1 мм)

Fig. 2. Dependence of the flame propagation velocity on the oxygen concentration in the mixture and the direction of combustion: *1–3* — nylon cloth (article 56003) in the direction accordingly *a*, *b* and *c*; *4* — wire fire polyethylene MPCMU (diameter 1 mm)

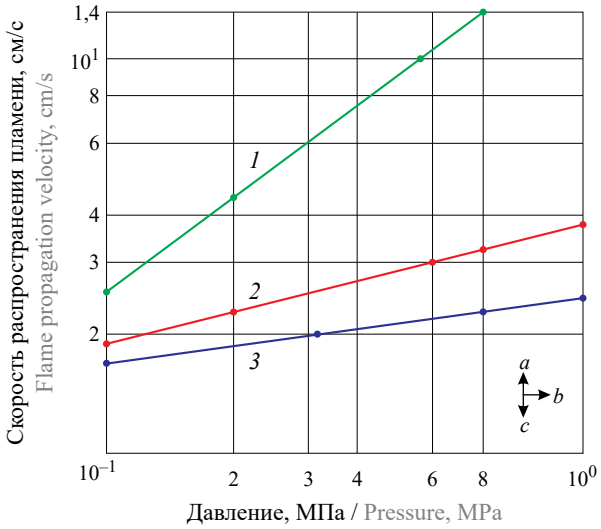


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени для хлопчатобумажной ткани (артикул 234) от давления среды и направления горения: *1 — a*; *2 — b*; *3 — c*
Fig. 3. The dependence of the flame propagation velocity for cotton (cotton) fabric (article 234) on the pressure of the medium and the direction of combustion: *1 — a*; *2 — b*; *3 — c*

пламени u_n вверх намного превышает скорость его движения в других направлениях. Например, для ХБ тканей плотностью ρ = 0,148 кг/м² при давлении 0,8 МПа скорость распространения пламени вверх составляет 0,14 см/с, а вниз при том же давлении — 0,24 см/с.

В работах [24, 25] аналитически показано, что для тканей на основе одного и того же вещества (натуральные или химические волокна) произведение параметра u_n на плотность ткани ρ — величина постоянная. Выявленная закономерность является важной с практической точки зрения, так как позволяет по результатам для одного материала определять величину u_n и для других материалов по значению их плотности. В работе [24] проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости скорости распространения пламени в воздушной среде снизу вверх от плотности ХБ тканей. Оказалось, что в исследованном диапазоне плотностей материала ρ (от 400 до 2800 кг/м³) скорость распространения пламени по ХБ тканям может быть представлена эмпирической формулой:

$$u_n = 0{,}24\rho^{-1{,}26}. \quad (2)$$

В представительных экспериментальных исследованиях (в гермокамерах объемом 0,1 и 2,5 м³) проведены исследования [25] процессов горения полимерных материалов (пенополистирола, полиметилметакрилата, двойной капроновой ленты и капроновых тканей) при изменении температуры и давления газовой среды с повышенным содержанием кислорода. В опытах устанавливали зависимость среднеобъемной температуры газовой среды от времени горения, геометрических размеров образца (в том числе при изменении скорости потока с повышенным содержанием кислорода). На основании физических моделей исследуемых процессов получены зависимости изменения среднеобъемной температуры газовой среды при горении полимерных материалов в замкнутых объемах, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Установлено, что при горении полимерных материалов в герметичных камерах рост температуры газовой среды происходит до определенного значения, обусловленного площадью горения образца материала, условиями теплообмена и размерами (площадью) тепловоспринимающих поверхностей камер.

Теплота сгорания материалов

Теплота сгорания Q также является важным показателем пожарной опасности горючих веществ и материалов. Величину Q используют при сравнительной оценке горючести материалов, в расчетах при определении уровня пожарной опасности объектов защиты, параметров тушения пожаров. Значения Q определяют калориметрическим методом[1] в атмосфере кислорода при давлении ~3 кПа. Естественно, эти значения могут отличаться от значений, полученных при других условиях (в атмосфере, отличной от кислородной и, соответственно, близкой к реальной). Кроме того, в литературе отсутствовали сведения о значениях теплоты сгорания в атмосфере с изменяющимся соотношением кислорода и азота. В связи с этим были проведены соответствующие исследования, результаты которых представлены в [26].

Экспериментальная установка в основном соответствовала[1]. В качестве образцов для испытаний выбирали материалы, сильно отличающиеся по химическим и физическим свойствам. На рис. 4 представлены результаты опытов.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что значения теплоты сгорания разных материалов существенно отличаются друг от друга. Например, в атмосфере с 80%-ным содержанием кислорода теплота сгорания бумаги составляет 13,4 МДж/кг, а углеродной ткани — 32,7 МДж/кг. Можно также отметить различный характер зависимости параметра Q от концентрации кислорода в потоке. Так, для органического стекла и углеродной ткани эта величина остается практически постоянной с изменением концентрации кислорода при выделении тепла в количестве, близком к максимально возможному. Это означает, что для органического стекла и углеродной ткани на воздухе

[1] ГОСТ Р 56025–2014. Материалы строительные. Метод определения теплоты сгорания. ISO 1716.2010.

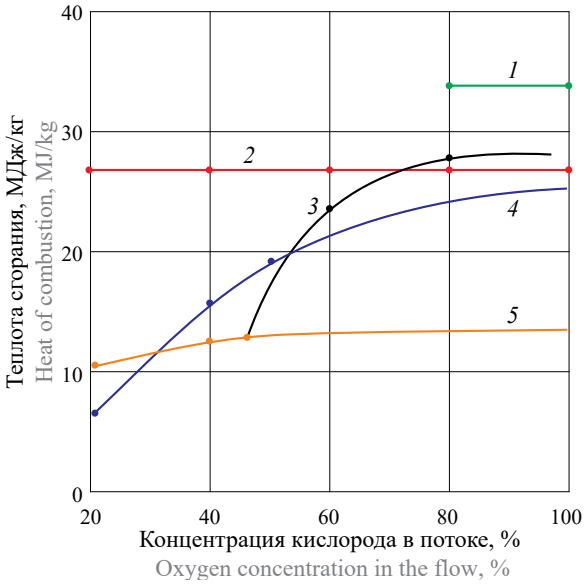


Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания материалов от концентрации кислорода в потоке: *1* — углеродная ткань; *2* — органическое стекло; *3* — материал «Лола»; *4* — материал «Оксален-С»; *5* — бумага писчая

Fig. 4. The dependence of the heat of combustion of materials on the oxygen concentration in the flow: *1* — carbon fabric; *2* — organic glass; *3* — "Lola" material; *4* — "Oxalen-S" material; *5* — writing paper

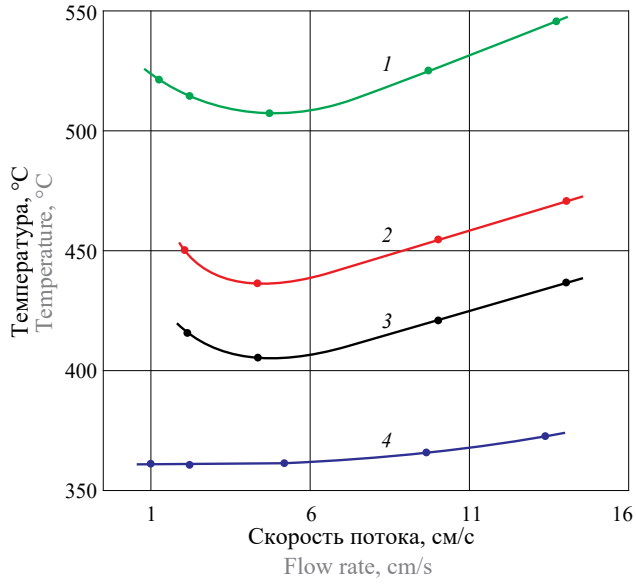


Рис. 5. Зависимость температуры самовоспламенения полиметилметакрилата от скорости потока для различных концентраций кислорода: *1* — 21 % об.; *2* — 40 % об.; *3* — 60 % об.; *4* — 100 % об.

Fig. 5. Dependence of the self-ignition temperature of poly methyl methacrylate on the flow rate for different oxygen concentrations: *1* — 21 % vol.; *2* — 40 % vol.; *3* — 60 % vol.; *4* — 100 % vol.

и в кислороде реакция окисления протекает до конца с образованием конечных продуктов реакции. При горении других материалов, таких как бумага, ткани «Лола», «Оксалон-С», с ростом концентрации кислорода тепловыделение увеличивается. Это обусловлено тем, что при горении этих материалов, наряду с горючими летучими соединениями, образуется коксовый остаток, а его горение возможно лишь в атмосфере с высоким содержанием кислорода. В этих условиях с увеличением концентрации кислорода в газовой фазе количество недогоревшего коксового остатка уменьшается, в результате чего теплота сгорания материала возрастает.

Таким образом, из полученных результатов можно сделать вывод, что теплота сгорания в значительной степени зависит от условий, при которых происходит горение. В реальных пожарах теплота сгорания веществ и материалов может быть существенно ниже, поэтому при оценке пожарной опасности полимеров целесообразно пользоваться величиной Q, определенной при рабочих параметрах атмосферы. Вместе с тем значения теплоты сгорания, представленные в справочной литературе и полученные стандартным методом в атмосфере кислорода, имеют определенный запас надежности.

Температура самовоспламенения

Наряду с характеристикой горючести материалов, важными параметрами, определяющими его чувствительность к воспламенению, являются энергетические характеристики его источников зажигания (для веществ и материалов — температура, тепловой поток). Для определения энергетических характеристик экспериментально определяли температуру самовоспламенения материала (тепловой источник) от различных источников зажигания [27, 28].

Экспериментальные исследования условий самовоспламенения материалов проводили при давлении от 0,02 до 0,25 МПа и концентрации кислорода до 100 %. На рис. 5 представлена зависимость температуры самовоспламенения полиметилметакрилата от скорости потока при различных концентрациях кислорода.

Поскольку в данном случае воспламенение твердого материала происходит в пограничном слое, наличие экстремума на рис. 5 можно объяснить взаимодействием свободной и вынужденной конвекции в режиме противотока. С повышением концентрации окислителя наблюдается постепенное вырождение экстремума температуры и слабое влияние на время тушения режима обтекания образца газовым потоком. Иначе говоря, эффект взаимодействия свободной и вынужденной конвекции нивелируется окислительными процессами в условиях высокого содержания в атмосфере кислорода.

Результаты исследований зависимости температуры самовоспламенения от давления и концентрации кислорода в потоке показывают, что вблизи

пределов горения по концентрации окислителя и давлению температура самовоспламенения существенно возрастает и наступает режим, в котором может происходить газификация образца без воспламенения.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований пожарной опасности строительных и конструкционных материалов в обогащенных кислородом средах и при повышенном давлении предложены пути повышения предельной концентрации кислорода (ПКК) и снижения горючести материалов, а именно: применение теплоотводящей поверхности, негорючей оболочки; введение ингибиторов в их состав и структуру; поверхностная обработка различными огнезащитными составами и пропитками.

Установлено, что предельная концентрация кислорода зависит от геометрических размеров образца (существенное снижение ПКК наблюдалось лишь при толщине материала менее 2–3 мм), а также от скорости газового потока. При повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается. В диапазоне давлений от 0,05 до 0,15 МПа эта характеристика изменяется незначительно, а при значениях ниже 0,05 МПа наблюдается резкое повышение ПКК, что обусловлено наличием предельного давления.

Наличие теплоотводящей поверхности ведет к повышению ПКК, которая возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Это объясняется тем, что при горении в материале и подложке устанавливается градиент температур, который и определяет величину предельной концентрации кислорода. Повышение ПКК можно обеспечить также применением негорючей оболочки материала, например из стеклоткани. Оболочка из стеклоткани играет роль диффузионного и теплового экрана, уменьшая тепловой поток из зоны горения к поверхности материала и препятствуя диффузии продуктов пиролиза от его поверхности в зону горения.

Повышения ПКК можно добиться изменением химического состава и структуры полимерного материала**.** Установлено, что для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, характерно снижение ПКК при увеличении в макромолекуле полимера количества атомов водорода. Иное влияние на ПКК оказывает углерод в составе полимерного материала. Результаты опытов показали, что более карбонизированные композиции материала имеют и более высокие значения ПКК. Это обусловлено теплопотерями излучением из зоны горения, которые составляют около 75 % от общего тепловыделения.

Исследование влияния содержания в составе материала инертных наполнителей на ПКК на примере композиций, включающих эпоксидную смолу и кварцевый песок в различных соотношениях, показало: существенное повышение ПКК наблюдается лишь для материалов, содержащих большое количество (80–90 % масс.) инертного наполнителя. Для искусственных кож, имеющих в составе несколько компонентов, горючесть обусловлена наиболее горючим из них. Повышения ПКК достигают также путем обработки материалов различными огнезащитными пропитками.

Определены показатели пожарной опасности материалов (температуры самовоспламенения, скорости распространения пламени, площади выгорания, теплоты сгорания, режимов зажигания) в зависимости от давления и содержания кислорода в атмосфере. Предложена аналитическая зависимость скорости распространения пламени от давления газовой среды и содержания в ней кислорода. Показано, что скорость горения возрастает с ростом давления и содержания кислорода в атмосфере для всех направлений горения.

При исследовании зависимости теплоты сгорания материалов в различных азотно-кислородных атмосферах можно отметить ее различный характер. Так, для органического стекла и углеродной ткани эта величина остается практически постоянной с изменением концентрации кислорода. При горении других материалов, таких как бумага, ткани «Лола», «Оксалон-С», с ростом концентрации кислорода возрастает и тепловыделение. Поэтому при оценке пожарной опасности полимеров целесообразно пользоваться величиной теплоты сгорания, определенной при рабочих параметрах атмосферы.

Результаты исследований зависимости температуры самовоспламенения от давления и концентрации кислорода в потоке показывают, что вблизи пределов горения по концентрации окислителя и по давлению температура самовоспламенения существенно возрастает и наступает режим, в котором может происходить газификация материала без воспламенения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ahmed A.F., Hoa S.V.* Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation // Journal of Composite Materials. 2012. Vol. 46. Issue 13. Pp. 1544–1559. DOI: 10.1177/0021998311418850
2. *Denison D.M.*, *Ernsting J., Cresswell A.W.* Hyperbaric oxygen // Lancet. 1966. Vol. 2. Pp. 1404–1406.

3. *Denison D.M., Ernsting J., Tonkins W.J., Cresswell A.W.* Problem of fire in oxygen-rich surroundings // Nature. 1968. Vol. 218. P. 1110.
4. *Мелихов А.С.* Обеспечение пожарной безопасности гермоотсеков космических летательных аппаратов. М. : ВНИИПО МЧС России, 2021. 728 с.
5. *Loganathan T.M., Hameed Sultan M.T., Ahsan Q., Jawaid M., Naveen J., Md Shah A.U. et al.* Effect of cyrtostachys renda fiber loading on the mechanical, morphology, and flammability properties of multi-walled carbon nanotubes/phenolic bio-composites // Nanomaterials. 2021. Vol. 11. Issue 11. P. 3049. DOI: 10.3390/nano11113049
6. *Bazaras Ž., Lukoševičius V., Bazaraitė E.* Structural materials durability statistical assessment taking into account threshold sensitivity // Metals. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 175. DOI: 10.3390/met12020175
7. *Болодьян И.А., Волохина А.В., Жевлаков А.Ф., Мелихов А.С., Потякин В.И.* О способности тканей к горению при повышенных давлениях // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 14–18.
8. *Гриневич С.Н., Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Мышак Ю.А., Селиванов А.П.* Горючесть фосфор-бромсодержащих пенополиуретанов // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977.С. 56–61.
9. *Shebeko A.Y., Shebeko Y.N., Zuban A.V., Golov T.V.* Experimental investigation of the ignition of combustible gas mixtures by friction sparks // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 264–274. DOI: 10.1134/S0010508218030024
10. *Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Trubachev S., Shaklein A., Karpov A. et al.* Mechanisms of the action of fire-retardants on reducing the flammability of certain classes of polymers and glass-reinforced plastics based on the study of their combustion // Polymers. 2022. Vol. 14. Issue 21. P. 4523. DOI: 10.3390/polym14214523
11. *Фланкин Е.В., Востриков И.М., Синельщикова В.В.* Исследование пожарной опасности кабелей на основе проводников с полиэтиленовой изоляцией // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 21–29.
12. *Романенко И.Г., Левитес Ф.А.* Огнезащита строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1991. 321 с.
13. *Jeon J., Shin D., Choi W., Kim S.J.* Identification of the extinction mechanism of Lean limit hydrogen flames based on Lewis number effect // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 174. P. 121288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121288
14. *Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Shebeko A.Y., Tanklevsky L.T.* Flammability of polymeric materials used in construction // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102. Issue 2. P. 10203. DOI: 10.34910/MCE.102.3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/flammability-of-polymeric-materials-used-in-construction
15. *Braun U., Bahr H., Sturm H., Schartel B.* Flame retardancy mechanisms of metal phosphinates and metal phosphinates in combination with melamine cyanurate in glass-fiber reinforced poly(l,4-butylene terephthalate): the influence of metal cation // Polym. Advan. Technol. 2008. Vol. 19. Issue 6. Pp. 680–692. DOI: 10.1002/pat.1147
16. *Ушаков В.А., Асеева Р.М., Андриянов Р.А., Бикбулатова Е.Н.* Пути снижения горючести полимерных материалов // Пластические массы. 1975. № 12. С. 36.
17. *Daal M., Zobrist N., Sadoulet B., Robertson M., Kellaris N.* Properties of selected structural and flat flexible cabling materials for low temperature applications // Cryogenics. 2019. Vol. 98. Pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.10.019
18. *Mascarenhas V.J., Weber C.N., Westmoreland P.R.* Estimating flammability limits through predicting non-adiabatic laminar flame properties // Proceedings of the Combustion Institute. 2021. Vol. 38. Issue 3. Pp. 4673–4681. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.026
19. *Меркулов В.А., Кузьменко К.П., Болодьян И.А.* О предельных условиях горения материалов при повышенных давлениях в O_2-N_2 и O_2-Не средах // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 60–63.
20. *Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Жаркова М.А., Соломон З.Г.* Способность к горению тканей на основе комбинированных волокон // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 5–10.
21. *Ермакова И.С., Демидов М.Л., Кербер М.Л., Селиванов А.П.* О снижении способности к горению стеклопластиков при использовании соединений ряда фосфазена // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 10–14.
22. *Жевлаков А.Ф., Грошев Ю.М., Волохина А.В., Щетинин А.М.* Экспериментальное исследование скорости распространения пламени по тканям различного состава // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 15–20.

23. *Мелихов А.С., Фланкин Е.В., Третьяков В.А., Синельщикова В.В.* Исследование скорости распространения пламени и площади выгорания тканей в средах с различным содержанием кислорода при повышенных давлениях // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 19–29.
24. *De Ris J.* Spread of a laminar diffusion flame // Symposium (International) on Combustion. 1969. Vol. 12. Issue 1. Pp. 241–252. DOI: 10.1016/s0082-0784(69)80407-8
25. *Rodríguez-Prieto A., Camacho A.M., Sebastián M.A.* Multicriteria materials selection for extreme operating conditions based on a multiobjective analysis of irradiation embrittlement and hot cracking prediction models // International Journal of Mechanics and Materials in Design. 2018. Vol. 14. Issue 4. Pp. 617–634. DOI: 10.1007/s10999-017-9393-2
26. *Попов А.М., Николаев В.М., Мелихов А.С., Болодьян И.А.* Расчетно-экспериментальные исследования горения полимерных материалов в замкнутых объемах при повышенном содержании кислорода в атмосфере // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 31–38.
27. *Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Монахов Н.А., Мышак Ю.А.* О теплоте сгорания полимерных материалов // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 62–67.
28. *Болодьян И.А., Жевлаков А.Ф., Мелихов А.С.* О способности полимеров к горению в кислородноазотной атмосфере, содержащей водород // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащеных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. 6 с.

REFERENCES

1. Ahmed A.F., Hoa S.V. Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation. *Journal of Composite Materials*. 2012; 46(13):1544-1559. DOI: 10.1177/0021998311418850
2. Denison D.M., Ernsting J., Cresswell A.W. Hyperbaric oxygen. *Lancet*. 1966; 2:1404-1406.
3. Denison D.M., Ernsting J., Tonkins W.J., Cresswell A.W. Problem of fire in oxygen-rich surroundings. *Nature*. 1968; 218:1110.
4. Melikhov A.S. *Ensuring fire safety of hermetic compartments of spacecraft*. Moscow, VNIIPO EMERCOM of Russia, 2021; 728. (rus).
5. Loganathan T.M., Hameed Sultan M.T., Ahsan Q., Jawaid M., Naveen J., Md Shah A.U. et al. Effect of cyrtostachys renda fiber loading on the mechanical, morphology, and flammability properties of multi-walled carbon nanotubes/phenolic bio-composites. *Nanomaterials*. 2021; 11(11):3049. DOI: 10.3390/nano11113049
6. Bazaras Ž., Lukoševičius V., Bazaraitė E. Structural materials durability statistical assessment taking into account threshold sensitivity. *Metals*. 2022; 12(2):175. DOI: 10.3390/met12020175
7. Bolodyan I.A., Volokhina A.V., Zhevlakov A.F., Melikhov A.S., Potyakin V.I. On the ability of tissues to flame at elevated pressures. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works.* Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 14-18. (rus).
8. Grinevich S.N., Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Myshak Yu.A., Selivanov A.P. Flammability of phosphorus-bromine-containing polyurethane foams. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works.* Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 56-61. (rus).
9. Shebeko A.Y., Shebeko Y.N., Zuban A.V., Golov T.V. Experimental investigation of the ignition of combustible gas mixtures by friction sparks. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018; 54(3):264-274. DOI: 10.1134/S0010508218030024
10. Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Trubachev S., Shaklein A., Karpov A. et al. Mechanisms of the action of fire-retardants on reducing the flammability of certain classes of polymers and glass-reinforced plastics based on the study of their combustion. *Polymers.* 2022; 14(21):4523. DOI: 10.3390/polym14214523
11. Flankin E.V., Vostrikov I.M., Sinelshchikova V.V. Investigation of fire hazard of cables based on conductors with polyethylene insulation. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIIPO, 1981; 21-29. (rus).
12. Romanenko I.G., Levites F.A. *Fire protection of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991; 321. (rus).
13. Jeon J., Shin D., Choi W., Kim S.J. Identification of the extinction mechanism of Lean limit hydrogen flames based on Lewis number effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 174:121288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121288
14. Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Shebeko A.Y., Tanklevsky L.T. Flammability of polymeric materials used in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 102(2):10203. DOI: 10.34910/MCE.102.3 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/flammability-of-polymeric-materials-used-in-construction

15. Braun U., Bahr H., Sturm H., Schartel B. Flame retardancy mechanisms of metal phosphinates and metal phosphinates in combination with melamine cyanurate in glass-fiber reinforced poly(l,4-butylene terephthalate): the influence of metal cation. *Polymers for Advanced Technologies*. 2008; 19(6):680-692. DOI: 10.1002/pat.1147
16. Ushakov V.A., Aseeva P.M., Andrianov R.A., Bikbulatova E.N. Ways to reduce the flammability of polymer materials. *Plastic masses*. 1975; 12:36. (rus).
17. Daal M., Zobrist N., Sadoulet B., Robertson M., Kellaris N. Properties of selected structural and flat flexible cabling materials for low temperature applications. *Cryogenics*. 2019; 98:47-59. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.10.019
18. Mascarenhas V.J., Weber C.N., Westmoreland P.R. Estimating flammability limits through predicting non-adiabatic laminar flame properties. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 38(3):4673-4681. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.026
19. Merkulov V.A., Kuzmenko K.P., Bolodyan I.A. On the limiting conditions of gorenje materials at elevated pressures in O_2-N_2 and OHe media. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIIPO, 1981; 60-63. (rus).
20. Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Zharkova M.A., Solomon Z.G. The ability to combustion fabrics based on combined fibers. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIIPO, 1981; 5-10. (rus).
21. Ermakova I.S., Demidov M.L., Kerber M.L., Selivanov A.P. On the reduction of the ability to combustion fiberglass when using compounds of a number of phosphazene. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIIPO, 1981; 10-14. (rus).
22. Zhevlakov A.F., Groshev Yu.M., Volokhina A.V., Shchetinin A.M. Experimental study of the flame propagation velocity through tissues of various composition. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIIPO, 1981; 15-20. (rus).
23. Melikhov A.S., Flankin E.V., Tretyakov V.A., Sinelshchikova V.V. Investigation of flame propagation velocity and tissue burnout area in media with different oxygen content at elevated pressures. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 19-29. (rus).
24. De Ris J. Spread of a laminar diffusion flame. *Symposium (International) on Combustion*. 1969; 12(1):241-252. DOI: 10.1016/s0082-0784(69)80407-8
25. Rodríguez-Prieto A., Camacho A.M., Sebastián M.A. Multicriteria materials selection for extreme operating conditions based on a multiobjective analysis of irradiation embrittlement and hot cracking prediction models. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2018; 14(4):617-634. DOI: 10.1007/s10999-017-9393-2
26. Popov A.M., Nikolaev V.M., Melikhov A.S., Bolodyan I.A. Computational and experimental studies of the combustion of polymer materials in closed volumes at elevated sod flame. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 31-38. (rus).
27. Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Monakhov N.A., Myshak Yu.A. On the heat of combustion of polymer materials *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 62-67. (rus).
28. Bolodyan I.A., Zhevlakov A.F., Melikhov A.S. On the ability of polymers to burn in an oxygen-nitrogen atmosphere containing hydrogen. *Questions of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched media : collection of scientific papers*. Issue 2. Moscow, VNIIPO, 1977; 6. (rus).

Поступила 24.04.2023, после доработки 03.05.2023;
принята к публикации 22.05.2023
Received April 24, 2023; Received in revised form May 3, 2023;
Accepted May 22, 2023

Информация об авторах

БОЛОДЬЯН Иван Ардашевич, 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; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

Information about the authors

Ivan A. BOLODYAN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

ВОГМАН Леонид Петрович, д-р техн. наук, 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; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

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

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

Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А. Риски производственного травматизма и гибели личного состава оперативных подразделений МЧС России (2012–2021 гг.) : монография / науч. ред. В.И. Евдокимов ; Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. СПб. : Измайловский, 2022. 147 с. (Серия «Заболеваемость военнослужащих» ; вып. 19).

В подготовке разделов монографии принимали участие: В.А. Маштаков, Н.А. Панкратов, Е.Ю. Удавцова, В.В. Харин.

ISBN 978-5-00182-043-7. Табл. 80, рис. 35, библиогр. 47 назв. тираж 500 экз.

Проанализированы травмы, в том числе фатальные, связанные с исполнением служебных обязанностей, у личного состава (военнослужащих, сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) оперативных подразделений МЧС России за 10 лет (2012–2021 гг.).

Полученные травмы соотнесены с причинами (технические, организационные, психофизиологические и опасные факторы пожаров) и 18 обстоятельствами, деятельностью личного состава МЧС России (ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций, учебно-спортивная и повседневная), категориями (оперативный состав, профилактический, технический и управленческий персонал) и оперативными подразделениями МЧС России. В связи с невысокими показателями риска или уровнем производственного травматизма по некоторым обстоятельствам его уровень рассчитали на 10 тыс. человек ($\times 10^{-4}$), гибели — на 100 тыс. ($\times 10^{-5}$). Среднегодовой уровень риска производственных травм у личного состава оперативных подразделений МЧС России в 2012–2021 гг. был $(11{,}57 \pm 0{,}68) \cdot 10^{-4}$, гибели — $(9{,}49 \pm 1{,}37) \cdot 10^{-5}$. В динамике отмечается уменьшение рисков производственного травматизма и гибели.

Монография будет полезна для широкого круга специалистов, занимающихся вопросами охраны труда, профилактики травматизма в подразделениях МЧС России и в целом по стране. Полная версия книги содержится на сайте Научной электронной библиотеки (eLIBRARY ID: 49594826). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49594826

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 31–40
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):31-40

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841; 536.468

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.31-40

Исследования характеристик пожарной опасности паркетов исторических объектов с массовым пребыванием людей

Татьяна Юрьевна Еремина[1], Ольга Владимировна Сушкова[2] ✉

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

[2] Государственный Эрмитаж, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Чтобы выяснить, насколько существенно влияют исторические паркеты на безопасную эвакуацию людей на объектах культурного наследия, требуется выполнить математическое моделирование распространения опасных факторов пожара (ОФП) с исходными параметрами существующей горючей нагрузки.

Цель. Рассмотреть экспериментально полученные характеристики пожарной опасности исторической древесины в сравнении с требуемыми показателями для напольных покрытий на путях эвакуации и в залах музеев. Сравнить полученные значения коэффициента дымообразования и низшей теплоты сгорания с имеющимися показателями в справочной литературе.

Материалы и методы. Для исследования характеристик пожарной опасности исторических покрытий полов в качестве образцов были отобраны плашки существующих паркетов сроком эксплуатации около 160 лет в залах Зимнего дворца Государственного Эрмитажа. Экспериментальные определения показателей проводились на соответствующих испытательных установках стандартными методами.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов исследования демонстрирует несоответствие характеристик пожарной опасности исторической древесины установленным законодательно требованиям к покрытию полов в зальных помещениях по показателям дымообразующей способности и воспламеняемости, в коридорах, холлах фойе — по дымообразующей способности.

Полученные опытным путем значения дымообразующей способности отличаются от справочных, используемых при расчете динамики нарастания ОФП для зданий музеев и выставок, более высокими показателями. Также имеют отличия от значений, указанных в справочной литературе, полученные в ходе исследования показатели низшей теплоты сгорания.

Выводы. Оценка сопоставленных результатов проведенного исследования с имеющимися показателями в справочной литературе позволяет утверждать о необходимости проведения научных экспериментов для определения характеристик пожарной опасности древесины исторических объектов с целью формирования справочной базы данных характеристик пожарной опасности материалов, примененных в музеях, расположенных во дворцах — объектах культурного наследия. Использование уточненных справочных данных позволит повысить точность расчетов индивидуального пожарного риска на исторических объектах.

Ключевые слова: объекты культурного наследия; термодеструкция; горючая нагрузка; коэффициент дымообразования; низшая теплота сгорания; опасные факторы пожара

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретическое и экспериментальное проектирование новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007)

Для цитирования: *Еремина Т.Ю., Сушкова О.В.* Исследования характеристик пожарной опасности паркетов исторических объектов с массовым пребыванием людей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 31–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.31-40

✉ *Сушкова Ольга Владимировна*, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Research of fire hazard characteristics of parquet floor in historical public buildings

Tatyana Yu. Eremina[1], Olga V. Sushkova[2] ✉

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

[2] The State Hermitage Museum, Saint Petersburg, Russian Federation

© Т.Ю. Еремина, О.В. Сушкова, 2023

ABSTRACT

Introduction. To find out the influence of historical parquet floor on the safe evacuation of people in cultural heritage objects, it is necessary to carry out a mathematical modelling of fire hazard propagation with the initial parameters of the existing combustible load.
The purpose of the article is to consider the experimentally derived fire hazard characteristics of historical wood compared to the required values for flooring on evacuation routes and in museum halls. To compare the values of the smoke-developed index and the net heat of combustion with those available in the reference literature.
Materials and methods. To study the fire hazard characteristics of historical floor coverings, the dies of existing parquet floor with a service life of about 160 years in the halls of the Winter Palace at the State Hermitage Museum were selected as specimens. Experimental determinations of the indicators were carried out on the appropriate test equipment using standard methods.
Results and discussion. Analysis of the results of the research shows that the fire hazard characteristics of historical wood do not meet the legally established requirements for floor coverings in halls in terms of their smoke-forming capacity and flammability, and in corridors and foyer halls in terms of their smoke-forming capacity. The smoke-forming capacity values obtained experimentally differ from the reference values used to calculate the dynamics of the build-up of the DFF in the buildings of museums and exhibitions. In addition, the values of the net heat of combustion obtained in the study differ from those given in the reference literature.
Conclusions. An estimation of the results of the carried out research and the available indexes in the reference literature allows to assert necessity of carrying out of scientific experiments for definition of characteristics of fire hazard of wood of historical objects with the purpose of formation of the reference database of characteristics of fire hazard of materials, used in museums, located in palaces — objects of cultural heritage. The use of refined reference data will improve the accuracy of calculations of individual fire risk on historical objects.

Keywords: cultural heritage objects; thermal destruction; combustible load; smoke-developed index; net heat of combustion; fire hazards

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety in the operation of buildings and structures in conditions of man-made and biogenic threats No. FSWG-2020-0007)

For citation: Eremina T.Yu., Sushkova O.V. Research of fire hazard characteristics of parquet floor in historical public buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):31-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.31-40 (rus).

✉ *Olga Vladimirovna Sushkova*, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Введение

Согласно статистическим данным, приведенным в сборнике ВНИИПО [1], всего на объектах Министерства культуры РФ в 2021 г. зафиксировано 17 пожаров с прямым ущербом в 27 061 000 руб. Из них в зданиях класса функциональной пожарной опасности Ф2.2 — музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения — в закрытых помещениях произошло 18 пожаров, прямой материальный ущерб от которых составил около 9 млн руб. Местом возникновения пожаров в помещениях для культурно-досуговой деятельности населения и религиозных обрядов 22 раза становились такие строительные конструкции, как пол, настил, ферма, балка, прогон (табл. 29.2 [1]).

Для музеев, расположенных во дворцах и являющихся объектами культурного наследия, полы нередко являются произведениями искусства. Художественные наборные паркеты создавали такие известные архитекторы, как Ф. Растрелли, А. Ринальди, А.Н. Воронихин, А.И. Штакеншнейдер и т.д. Паркеты, имеющие историческую ценность, подлежат охране в соответствии с требованиями Федерального закона[1].

К музеям — объектам с массовым пребыванием людей, в целях обеспечения пожарной безопасности нормативно-правовым актом[2] установлены требования к покрытию полов на путях эвакуации для общих коридоров, холлов, фойе В2, Д3, Т2, РП2 и в зальных помещениях В2, Д2, Т2, РП1. Чтобы понять, насколько существенно влияет древесина исторических объектов на безопасную эвакуацию посетителей, необходимо знать показатели пожарной опасности, состаренной в естественных условиях эксплуатации древесины, влияющие на распространение опасных факторов пожара (далее — ОФП), в помещениях здания культурно-исторического наследия и на основе реальных данных провести моделирование развития пожара, с учетом выбора напольного покрытия как места возникновения пожара.

В качестве материалов для наборного художественного паркета дворцов использовалась древесина различных пород и мест произрастания. Научные исследования влияния разновидности древесины на характеристики воспламеняемости, распространения пламени, тепловыделения доказывают, что развитие процесса горения зависит

[1] Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ.

[2] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

от породы и мест произрастания древесины [2–9]. Также на характеристики пожарной опасности древесины оказывают влияние физико-химические изменения, связанные с возрастом эксплуатации древесины [10–16].

Для проведения расчетов по определению величин пожарного риска в зданиях, согласно Методике[3], за исходные данные свойств горючей нагрузки необходимо принимать данные экспериментальных исследований. Практика показывает, что, как правило, расчеты проводятся на основе данных, взятых из справочной литературы (например[4], [17–19]), что также допускается. В настоящее время в справочных базах показателей типовой горючей нагрузки собраны усредненные параметры, характерные для помещений определенного класса функциональной пожарной опасности. При этом имеются различия в показателях, собранных в справочной литературе для однородных помещений (табл. 1).

Представленные в табл. 1 данные демонстрируют расхождения особенно очевидные по показателям дымообразующей способности, линейной скорости распространения пламени, удельного расхода кислорода, выделения газообразных продуктов.

Важным условием для безопасной эвакуации людей при пожаре является своевременность. Это значит, что полная эвакуация людей из здания должна произойти раньше наступления предельно допустимых значений ОФП (критической продолжительности пожара), когда безопасное нахождение людей в здании становится невозможным. Основными факторами, определяющими критическую продолжительность пожара, являются: снижение видимости в дыму, повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения.

При расчете безопасной эвакуации, чтобы получить наиболее достоверные данные, необходимо знать пожароопасные свойства примененных материалов. Особенно это актуально для объектов с массовым пребыванием людей. Например, в Китае [20] была проанализирована возможность безопасной эвакуации в библиотеке колледжа на основе установленного максимального количества посетителей и величины пожарной нагрузки. Для упрощения расчетов в качестве пожарной нагрузки рассматривались только книги. Один из выводов, который делают авторы, — анализ безопасной эвакуации посетителей необходимо проводить более комплексно с учетом существующей пожарной нагрузки.

Таблица 1. Сравнительные показатели типовой горючей нагрузки
Table 1. Comparative indicators of typical fuel load

Показатели Indicators	Музеи, выставки Museums, exhibitions	
	Справочная литература Reference literature	
	[18]	[20]
Низшая теплота сгорания, МДж/кг Lowest heat of combustion, MJ/kg	14,000	13,800
Линейная скорость распространения пламени, м/с Linear speed of flame propagation, m/s	0,0163	0,0055
Удельная массовая скорость выгорания, кг/(м^2·с) Specific mass burnout rate, kg/(m^2·s)	0,01520	0,0145
Дымообразующая способность, Нп·м^2/кг Smoke generating capacity, Np·m^2/kg	53,00	270
Удельный расход кислорода, кг/кг Specific oxygen consumption, kg/kg	1,2180	1,0300
Выделение газа, кг/кг / Gas release, kg/kg		
CO_2	1,42300	0,20300
CO	0,02300	0,0022
HCl	0,00010	0,01400

В работе [21] представлены результаты исследования пожарной нагрузки в 43 старых зданиях разного функционального назначения, расположенных в Ору-Прету (штат Минас-Жерайс, Бразилия). Было отмечено, что на рассматриваемых объектах древесина составляет значительную часть пожарной нагрузки. При сравнении полученных результатов с результатами, установленными бразильским стандартом NBR 14432, оказалось, что измеренные значения в 10 раз могут превышать стандартные значения. Необходимость исследования пожарной нагрузки исторических зданий и сбор данных для национальной базы отмечаются в работе [22]. При изучении исторических храмов Индии [23] установлено, что площадь пола является основным параметром, влияющим на пожарную нагрузку в помещении, а древесина составляет значительную ее часть.

[3] Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382

[4] СИТИС СПН-1. Пожарная нагрузка. Справочник. Редакция 1 от 14.05.2014. ООО «СИТИС», 2014.

Различные виды древесины на объектах культурного наследия можно увидеть не только в художественных паркетах, но также в отделке стен и украшении потолков. В работе[5] по изучению 83 исторических зданий Пекина установлено,что постоянной пожарной нагрузкой в основном является древесина, и это значительно отличается от пожарной нагрузки современных зданий. Ее величина в среднем составляет 2847,7 МДж/м^2.

В работах[6] [24] рассматривались результаты экспериментального исследования газообразных продуктов термодеструкции образцов древесины в зависимости от возраста и вида. Полученный результат показал, что наряду с выделением диоксида углерода в определенный для каждого образца температурный промежуток происходит выделение уксусной кислоты, пары которой при пожаре могут увеличивать токсическое воздействие на человека во время его эвакуации.

Целью статьи является рассмотрение экспериментально полученных значений характеристик пожарной опасности по воспламеняемости, дымообразованию и токсичности продуктов горения исторической древесины дуба и древесины ясеня, состаренных в естественных условиях эксплуатации в сравнении с требуемыми показателями напольных покрытий на путях эвакуации для общих коридоров, холлов, фойе и в зальных помещениях для объектов класса функциональной пожарной опасности Ф2.2, а также сравнение полученных в ходе исследования значений коэффициента дымообразования и низшей теплоты сгорания с имеющимися показателями в справочной литературе.

Материалы и методы

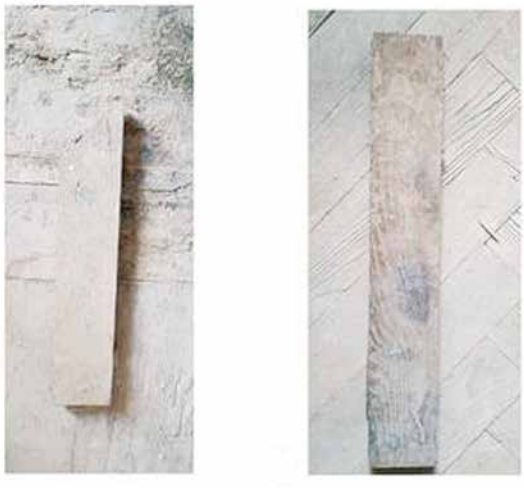
Как известно, древесина являлась основным горючим материалом, использовавшимся в строительстве и отделке дворцовых интерьеров. Конструкция пола состояла из щита, выполненного из сбитых сосновых досок, на которые крепилась дубовая фанера. Щит укладывался на решетку из сухих прочных сосновых досок и к нему прикле-

Рис. 1. Конструкция исторического пола
Fig. 1. Construction of the historical floor

ивались паркетные плашки (рис. 1). За отличные эксплуатационные характеристики в производстве паркетов широко применялись древесина дуба и древесина ясеня.

Для проводимого исследования показателей пожарной опасности древесины с исторических объектов в качестве образцов были отобраны элементы существующего паркета в залах Зимнего дворца Государственного Эрмитажа, которым присвоены номера: паркетные плашки из древесины дуба — образец № 1 и древесины ясеня — образец № 2 (рис. 2). Согласно архивным сведениям музея, возраст эксплуатации пола и паркета составляет около 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении, декоративно-отделочное покрытие паркета отсутствует.

Исследуемые образцы предварительно высушивались до получения постоянного веса. Экспериментальные определения характеристик пожарной опасности проводились на соответствующих испытательных установках стандартными методами: коэффициент дымообразования и показа-



a *b*

Рис. 2. Образцы для исследования: *a* — древесина дуба (образец № 1); *b* — древесина ясеня (образец № 2)
Fig. 2. Specimens for research: *a* — oak wood (specimen No. 1); *b* — ash wood (specimen No. 2)

[5] *Li J., Li X., Zhou B., Wang H.* Research and statistical analysis of the fire load of 83 historic buildings in Beijing // International Journal of Architectural Heritage. 2018. DOI: 10.1080/15583058.2018.1550535. URL: https://www.researchgate.net/publication/329490516

[6] *Сушкова О.В.* Экспериментальное определение пожароопасных свойств материалов, примененных на путях эвакуации в зданиях культурного наследия. Актуальные проблемы комплексной безопасности в строительстве, тенденции развития в современных условиях : сб. докладов Всеросс. науч.-практ. конф. (Москва, 10–11 ноября 2021) // Минобрнауки РФ, Национальный исследовательский Московский гос. ун-т, Институт гидроэнергетического стр-ва, кафедра комплексной безопасности в строительстве. М. : Изд-во МИСИ – МГСУ, 2021. URL: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/

тель токсичности продуктов горения согласно п. 4.18 и 4.20 ГОСТ 12.1.044–89[7] соответственно; параметры воспламеняемости в соответствии с ГОСТ 30402–96[8]; теплота сгорания определялась по ГОСТ 33106–2014[9]. Для проведения испытаний по определению показателей дымообразующей способности и токсичности продуктов горения были подготовлены образцы состаренной древесины дуба и ясеня размерами 40 × 40 × 10 мм. Для определения группы воспламеняемости испытывались образцы размером 165 × 165 мм фактической толщины: 10 мм древесины дуба и 19 мм древесины ясеня.

Определение свойств пожарной опасности образцов древесины проводилось на базе оборудования испытательных лабораторий ФГАОУ ВО «СПбПУ» и НИЦ «ПБ» ИКБС НИУ МГСУ.

Результаты и их обсуждение

Исследование коэффициента дымообразования проводилось в режимах пламенного горения и тления с использованием газовой горелки с длиной пламени 10–15 мм. В каждом режиме подвергалось испытанию по пять образцов. Для каждого режима испытания определялся коэффициент дымообразования D_m как среднее арифметическое по результатам пяти испытаний. Результаты экспериментального определения показателя дымообразующей способности экземпляров образцов древесины представлены в табл. 2 и 3.

Анализ результатов экспериментального наблюдения показал, что полученные коэффициенты дымообразования в режиме тления (более 500 м²/кг) указывают на высокую дымообразующую способность (Д3).

Режимом испытаний для определения показателя токсичности продуктов горения был принят режим термоокислительного разложения (ТОР) при плотности теплового потока, в зависимости от испытываемого образца, от 18,0 кВт/м² (400 °С) до 32,5 кВт/м² (550 °С). Результаты экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения образцов древесины представлены в табл. 4.

Таблица 2. Результаты экспериментального определения показателя дымообразующей способности древесины дуба (образец № 1)

Table 2. Results of experimental determination of the smoke-forming capacity of oak wood (specimen No. 1)

Режим испытания / Test mode	Номер образца / Number Specimen	Начальная масса образца, г / Specimen initial mass, g	Светопропускание / Light transmission		Коэффициент дымообразования, м²/кг / Smoke-developed index, m²/kg
			Начальное, % / Initial, %	Конечное, % / Final, %	
Тление / Decay	1	2,68	100	5	733
	2	2,79	100	4	741
	3	2,72	100	4	760
	4	2,90	100	4	736
	5	2,42	100	6	774
Среднее значение в режиме тления $D_{m\,ср}$ = 749 м²/кг The average value in the smoldering mode $D_{m\,cf}$ = 749 m²/kg					
Горение / Combustion	1	6,83	100	51	63
	2	6,61	100	49	69
	3	10,47	100	35	65
	4	7,64	100	47	64
	5	6,96	100	50	64
Среднее значение в режиме горения $D_{m\,ср}$ = 65 м²/кг The average value in combustion mode $D_{m\,cf}$ = 65 m²/kg					

Анализ результатов экспериментального исследования демонстрирует, что все исследуемые образцы по показателю токсичности продуктов горения классифицируются как умеренно опасные (Т2).

Для установления группы воспламеняемости опыты повторяли при различных величинах поверхностной плотности теплового потока и определяли критическую (наименьшую) поверхностную плотность теплового потока (КППТП), при которой наблюдалось воспламенение и устойчивое пламенное горение образца. Результаты экспериментального определения группы воспламеняемости образцов древесины представлены в табл. 5 и 6.

Экспериментальное исследование группы воспламеняемости древесины свидетельствует, что представленные для проведения испытаний образцы относятся к группе легковоспламеняющихся материалов (В3).

[7] ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : утв. Постановлением Госстандарта СССР от 12.12.1989 № 3683.

[8] ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость : введ. в действ. Постановлением Минстроя РФ от 24.06.1996 № 18-40.

[9] ГОСТ 33106–2014 (EN 14918:2009). Межгосударственный стандарт. Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания.

Таблица 3. Результаты экспериментального определения показателя дымообразующей способности древесины ясеня (образец № 2)
Table 3. Results of experimental determination of the smoke-forming capacity of ash wood (specimen No. 2)

Режим испытания Test mode	Номер образца Number Specimen	Начальная масса образца, г Specimen initial mass, g	Светопропускание Light transmission		Коэффициент дымообразования, м²/кг Smoke-developed index, m²/kg
			Начальное, % Initial, %	Конечное, % Final, %	
Тление Decay	1	2,74	100	7	618
	2	2,71	100	7	637
	3	2,41	100	11	592
	4	2,90	100	6	619
	5	2,24	100	11	628
Среднее значение в режиме тления $D_{m\,ср}$ = 619 м²/кг The average value in the smoldering mode $D_{m\,cf}$ = 619 m²/kg					
Горение Combustion	1	8,45	100	39	71
	2	8,35	100	40	71
	3	7,28	100	41	79
	4	9,12	100	38	69
	5	8,52	100	39	72
Среднее значение в режиме горения $D_{m\,ср}$ = 72 м²/кг The average value in combustion mode $D_{m\,cf}$ = 72 m²/kg					

Таблица 4. Результаты экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения (класс опасности — умеренно опасные)
Table 4. Results of experimental determination of the toxicity index of combustion products (class dangers — moderately dangerous)

Номер образца Number Specimen	Номер экземпляра образца Number Specimen copy	Температура испытания, °С Test temperature, °C	Потеря массы, г Weight loss, g	Массовая доля летучих веществ, % Mass fraction of volatile substances, %	Уровень выделения CO (gCO), мг/г CO release level (gCO), mg/g	Показатель токсичности H_{CL50}, г/м³ Toxicity indicator H_{CL50}, g/m³
1	1	400	8,72	88	52,9	92,6
	2	400	6,20	95	59,9	
	3	400	7,64	96	57,6	
2	1	500	7,23	98	80,9	67,7
	2	500	7,91	97	77,4	
	3	500	8,03	99	74,5	

Таблица 5. Результаты экспериментального определения группы воспламеняемости образцов древесины дуба (образец № 1)
Table 5. Results of experimental determination of the flammability group of oak wood specimens (specimen No. 1)

Номер опыта Number Specimen	Поверхностная плотность теплового потока, кВТ/м² Surface density of the heat flux, kW/m²	Время от момента начала теплового воздействия на образец до возникновения устойчивого пламенного горения, с The time from the moment of the beginning of the thermal effect on the sample to the occurrence of stable flame combustion, s
1	25	95
2	15	454
3	5	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
4	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
5	15	291
6	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
7	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
8	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
9	15	845
10	15	799

Измерение высшей теплоты сгорания выполнялось при сжигании образцов в калориметрической бомбе, заполненной кислородом при давлении 10–15 атм. Результаты измерений представлены в табл. 7.

Высшая теплота сгорания отличается от низшей на величину теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

В результате экспериментального исследования и проведенных расчетов определена низшая теплота сгорания для образцов древесины дуба — 16,5 МДж/кг и ясеня — 16,0 МДж/кг.

Таблица 6. Результаты экспериментального определения группы воспламеняемости образцов древесины ясеня (образец № 2)
Table 6. Results of experimental determination of the flammability group of ash wood specimens (specimen No. 2)

Номер опыта Number Specimen	Поверхностная плотность теплового потока, кВТ/м² Surface density of the heat flux, kW/m²	Время от момента начала теплового воздействия на образец до возникновения устойчивого пламенного горения, с The time from the moment of the beginning of the thermal effect on the sample to the occurrence of stable flame combustion, s
1	15	302
2	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
3	15	683
4	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
5	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
6	10	Устойчивого пламенного горения не наблюдалось Steady flame combustion was not observed
7	15	228
8	15	269

Таблица 7. Результаты измерений высшей теплоты сгорания образцов древесины дуба и древесины ясеня
Table 7. Results of measurements of the highest heat of combustion of oak and ash wood specimens

Номер опыта Experiment Number	Дуб Oak wood		Ясень Ash wood	
	Масса, г Weight, g	Теплота сгорания, МДж/кг Heat of combustion, MJ/kg	Масса, г Weight, g	Теплота сгорания, МДж/кг Heat of combustion, MJ/kg
1	0,9421	18,5	1,2511	17,9
2	0,8179	18,4	0,9558	17,7
3	1,1083	18,2	1,2633	18,1
Среднее значение Average value		18,4	17,9	

Выводы

Анализ полученных результатов экспериментального исследования пожароопасных характеристик исторических паркетов из древесины дуба и ясеня со сроком старения 160 лет демонстрирует, что показатели дымообразующей способности и воспламеняемости не соответствуют установленным требованиям к напольным покрытиям в зальных помещениях для объектов класса функциональной пожарной опасности Ф2.2. в табл. 29 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Превышен относительно установленного таблицей 28 № 123-ФЗ и показатель воспламеняемости для коридоров, холлов, фойе на путях эвакуации. Сравнение показателей представлено в табл. 8.

Таблица 8. Сравнительные показатели пожарной опасности исторических паркетов из древесины дуба и древесины ясеня с требованиями Федерального закона № 123-ФЗ
Table 8. Comparative fire hazard indicators of historical oak and ash wood parquet floors with the requirements of Federal Law No. 123-FZ

Материал Material	Требование не более The requirement is no more than	Практические (экспериментальные) Practical (experimental)
Дымообразующая способность Smoke generating capacity		
Дуб Oak wood	Для общих коридоров Д3 For common corridors D3	Д3 / D3
Ясень Ash wood	В зальных помещениях Д2 In the halls D2	Д3 / D3
Токсичность продуктов горения Toxicity of combustion products		
Дуб Oak wood	Для общих коридоров Т2 For common corridors T2	Т2
Ясень Ash wood	В зальных помещениях Т2 In the halls T2	Т2
Группа воспламеняемости Flammability group		
Дуб Oak wood	Для общих коридоров В2 For common corridors B2	В3
Ясень Ash wood	В зальных помещениях В2 In the halls B2	В3

Полученные опытным путем значения дымообразующей способности отличаются от справочных [18, 19], используемых для получения исходных данных при расчете динамики нарастания ОФП для зданий музеев и выставок. Числовой показатель коэффициента дымообразования в базе данных (табл. 1) значительно ниже. В табл. 9 приведены сравнительные значения результатов экспериментального исследования со справочными данными.

Также имеют отличия от значений, указанных в справочной литературе [18, 19], полученные в ходе исследования показатели низшей теплоты сгорания (табл. 10).

Результат проведенного исследования подтверждает, что моделирование динамики ОФП для объектов культурного наследия, выполненных

Таблица 9. Сравнительный показатель дымообразующей способности
Table 9. Comparative indicator of smoke-forming capacity

Источник Source		Коэффициент дымообразования, Нп·м²/кг Smoke-developed index, Np·m²/kg
Справочная литература Reference literature	[18]	53
	[19]	270
Исследование Experiment	Образец № 1 Specimen No. 1	749
	Образец № 2 Specimen No. 2	619

Таблица 10. Сравнительные значения низшей теплоты сгорания
Table 10. Comparative values of net heat of combustion

Источник Source		Низшая теплота сгорания, МДж/кг Net heat of combustion, MJ/kg
Справочная литература Reference literature	[18]	14,0
	[19]	13,8
Исследование Experiment	Образец № 1 Specimen No. 1	16,5
	Образец № 2 Specimen No. 2	16,0

на исходных данных, взятых из справочной литературы, может иметь значительные погрешности в определении времени блокирования путей эвакуации. Поэтому проведение научных экспериментов для определения характеристик пожарной опасности древесины с исторических объектов и внесение полученных показателей в базы справочной литературы является важным направлением.

Расчет пожарного риска, выполненный на реальных исходных данных, позволит более точно провести математическое моделирование распространения ОФП на путях эвакуации и установить допустимое количество единовременного нахождения людей в здании, обеспечив им безопасные условия эвакуации в случае возникновения пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат. сб. Балашиха : П 46 ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
2. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 1. С. 19–32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710
3. *Сивенков А.Б.* Влияние физико-химических характеристик древесины на ее пожарную опасность и эффективность огнезащиты : дис. … д-ра техн. наук. М., 2015. 289 с.
4. *Inari G.N., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt J., Gérardin P.* XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment // Surface and Interface Analysis. 2006. Vol. 38. Issue 10. Pp. 1336–1342. DOI: 10.1002/sia.2455
5. *Bañuls-Ciscar J., Abel M.-L., Watts J.F.* Characterisation of cellulose and hardwood organosolv lignin reference materials by XPS // Surface Science Spectra. 2016. Vol. 23. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1116/1.4943099
6. *Xu Q., Chen L., Harries K.A., Zhang F., Liu Q., Feng J.* Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. Pp. 416–427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062
7. *Kraniotis D., Nore K., Brückner C., Nyrud A.Q.* Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (picea abies) exposed to dynamic indoor climate // Journal of Wood Science. 2016. Vol. 62. Issue 2. Pp. 203–209. DOI: 10.1007/s10086-015-1528-1
8. *Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А.* Термический анализ древесины основных лесообразующих пород средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30. DOI: 10.15372/SJFS20150602
9. *Lowden L., Hull T.* Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. Issue 4. Pp. 1–19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
10. *Сивенков А.Б.* Влияние возраста деревянных конструкций зданий на значения показателей их пожарной опасности // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 3. С. 66–67.
11. *Сивенков А.Б., Барботько С.Л., Круглов Е.Ю., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. и др.* Характеристики тепловыделения при горении древесины // Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья — основа инновационного развития экономики России : мат. междунар. науч.-практ. конф. М. : ВИАМ, 2012. С. 86–88.
12. *Тарасов Н.И.* Система оценки влияния эксплуатационных и теплофизических факторов на пожароопасные характеристики древесных материалов : дис. … канд. техн. наук. СПб., 2013. 171 с.
13. *Анохин Е.А., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б.* Пожарная опасность ограждающих деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 10. С. 30–40. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.30-40

14. *Альменбаев М.М.* Пожарная опасность объектов культуры с материалами и конструкциями из древесины и лакокрасочными покрытиями : дис. … канд. техн. наук. М., 2015. 200 с.
15. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Влияние естественного старения на физико-химические и пожароопасные свойства древесины // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. Вып. 9 (158). С. 206–217. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22540241
16. *Шутов Ф.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозита «Penocom» на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 1. С. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37
17. *Корольченко А.Я., Корольченко Д.А.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч.I. М. : Пожнаука, 2004. 713 с.
18. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
19. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140.
20. *Chixiang M., Baotie S., Shimei S., Hui L.* Analysis of performance-based fire safety evacuation in a college library // Procedia Engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 399–406. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.069
21. *Claret A.M., Andrade A.T.* Fire load survey of historic buildings // Journal of Fire Protection Engineering. 2007. Vol. 17. Issue 2. Pp. 103–112. DOI: 10.1177/1042391506064912
22. *Thauvoye C., Zhao B., Klein J., Fontana M.* Fire load survey and statistical analysis // Fire Safety Science. 2008. Vol. 9. Pp. 991–1002. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-991
23. *Suresh N.* Fire Loads in heritage buildings // HARANA — Bhavan's International Journal of Business. 2015. Vol. 9. Issue 1. Pp. 17–21. URL: https://informaticsjournals.com/index.php/dbijb/article/view/16086
24. *Еремина Т.Ю., Сушкова О.В.* Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 24–38. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.24-38

REFERENCES

1. *Fires and fire safety in 2021: statistical collection*. Balashikha, P 46 FSBI VNIIPO EMERCOM of Russia, 2022; 114. (rus).
2. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(1):19-32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710 (rus).
3. Sivenkov A.B. *Influence of physico-chemical characteristics of wood on its fire hazard and fire protection efficiency : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2015; 289. (rus).
4. Inari G.N., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt J., Gérardin P. XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment. *Surface and Interface Analysis*. 2006; 38(10):1336-1342. DOI: 10.1002/sia.2455
5. Bañuls-Ciscar J., Abel M.-L., Watts J.F. Characterisation of cellulose and hardwood organosolv lignin reference materials by XPS. *Surface Science Spectra*. 2016; 23(1):1-8. DOI: 10.1116/1.4943099
6. Xu Q., Chen L., Harries K.A., Zhang F., Liu Q., Feng J. Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*. 2015; 96:416-427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062
7. Kraniotis D., Nore K., Brückner C., Nyrud A.Q. Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (picea abies) exposed to dynamic indoor climate. *Journal of Wood Science*. 2016; 62(2):203-209. DOI: 10.1007/s10086-015-1528-1
8. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal analysis of wood of the main tree species of central Siberia. *Siberian Journal of Forest Science*. 2015; 6:17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602 (rus).
9. Lowden L., Hull T. Flammability behavior of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2013; 2(4):1-19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
10. Sivenkov A.B. Influence of age of buildings wooden structures on characteristics of their fire hazard. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo/Industrial and Civil Engineering*. 2012; 3:66-67. (rus).
11. Aseeva R.M., Barbotko S.L., Kruglov E.Yu., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Characteristics of heat release during combustion wood. *New materials and technologies of deep processing of raw materials — the basis of innovative development of the Russian economy : materials of the international scientific and practical conference*. Moscow, VIAM, 2012; 86-88. (rus).
12. Tarasov N.I. *System for assessing the impact of operational and thermophysical factors on the fire-hazardous characteristics of wood materials : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2013; 171. (rus).

13. Anokhin E.A., Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B. Fire danger protecting wooden structures long term operation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(10):30-40. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.30-40 (rus).
14. Almenbayev M.M. *Fire danger of cultural objects with materials and structures made of wood and paint coatings : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2015; 200. (rus).
15. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Natural ageing effect on physicochemical and flammable propeties of the wood. *News of the SFU. Technical sciences.* 2014; 9(158):206-217. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22540241 (rus).
16. Shutov F.A., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Influence of polymeric foam composite "penocom" on fire resistance of wood frame separating constructions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(1):28-37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37 (rus).
17. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them. Reference book : in 2 parts. 2nd ed., reprint. and additional*. *Part I*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 713. (rus).
18. Koshmarov Yu.A. *Forecasting of fire hazards in the room : textbook.* Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
19. Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard : Approved by the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 1140 dated November 14, 2022. (rus).
20. Chixiang M., Baotie S., Shimei S., Hui L. Analysis of performance-based fire safety evacuation in a college library. *Procedia Engineering*. 2012; 43:399-406. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.069
21. Claret A.M., Andrade A.T. Fire load survey of historic buildings. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007; 17(2):103-112. DOI: 10.1177/1042391506064912
22. Thauvoye C., Zhao B., Klein J., Fontana M. Fire load survey and statistical analysis. *Fire Safety Science*. 2008; 9:991-1002. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-991
23. Suresh N. Fire loads in heritage. *HARANA — Bhavan's International Journal of Business*. 2015; 9(1):17-21. URL: https://informaticsjournals.com/index.php/dbijb/article/view/16086
24. Eremina T.Yu., Sushkova O.V. Experimental study of fire-hazardous characteristics of materials in the premises of buildings of cultural and historical heritage. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):24-38. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.24-38 (rus).

Поступила 15.11.2022, после доработки 07.12.2022;
принята к публикации 18.04.2023
Received November 15, 2022; Received in revised form December 7, 2022;
Accepted April 18, 2023

Информация об авторах

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; Scopus AuthorID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

СУШКОВА Ольга Владимировна, начальник сектора пожарной безопасности, Государственный Эрмитаж, Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 34; РИНЦ ID: 1124053; Scopus AuthorID: 57942111900; ORCID: 0000-0001-6549-1638; e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Вклад авторов:

Еремина Т.Ю. — *научное руководство; концепция исследования; редактирование и доработка текста; формулировка итоговых выводов.*

Сушкова О.В. — *планирование исследования; подготовка образцов; обобщение результатов исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus AuthorID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Olga V. SUSHKOVA, Head of Fire Safety Sector, the State Hermitage Museum, Dvortsovaya emb., 34, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; ID RISC: 1124053; Scopus AuthorID: 57942111900; ORCID: 0000-0001-6549-1638; e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Contribution of the authors:

Tatyana Yu. Eremina — *scientific guidance; research concept; editing and revision of the text; formulation of final conclusions.*

Olga V. Sushkova — *research planning; sample preparation; generalization of research results; writing the source text; final conclusions.*

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 41–53
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):41-53

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4/691.17

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.41-53

Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров

Валентин Анатольевич Ушков ✉, Анна Владимировна Горюнова, Михаил Евгеньевич Золотарев, Максим Валентинович Ушков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Снижение горючести газонаполненных полимеров, склонных к карбонизации, основано на применении фосфор- и борсодержащих соединений, уменьшающих образование горючих летучих продуктов пиролиза и повышающих выход коксового остатка. Это снижает скорость тепловыделения, тепло- и массоперенос между материалом и пламенем. В научной литературе приводятся данные о влиянии фосфорсодержащих антипиренов на термостойкость, горючесть и дымообразующую способность пенополиуретанов, но отсутствуют данные о влиянии концентрации фосфора на показатели пожарной опасности пенопластов.
Целью настоящей работы является разработка эффективных методов получения заливочных пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров с пониженной пожарной опасностью и высокими эксплуатационными характеристиками. Задачи: выявить влияние концентрации фосфора на технологические и физико-механические характеристики, термостойкость и пожарную опасность заливочных пенопластов, разработать теплоизоляционные материалы пониженной пожарной опасности с высокими эксплуатационными показателями.
Методы. Физико-механические свойства и показатели пожарной опасности пенопластов определяли по действующим ГОСТам. Термические свойства и состав продуктов горения пенопластов изучали с помощью термоаналитического комплекса DuPONT-9900 и хромато-масс-спектрометрии.
Результаты и их обсуждение. Концентрация фосфора при синтезе жестких пенополиуретанов с пониженной горючестью и высокими эксплуатационными характеристиками должна превышать 2,1 % масс. Слабогорючие карбамидные пенопласты получены при концентрации фосфора 0,2–0,3 % масс. Для получения нетлеющих слабогорючих резольных пенофенопластов концентрация фосфора составляет 0,6–0,7 % масс. При этом высокой эффективностью обладают фосфорорганические антипирены, содержащие реакционноспособные группы.
Выводы. В результате экспериментальных исследований выявлено влияние концентрации фосфора и содержания фосфорсодержащих антипиренов на физико-механические свойства, термостойкость и пожарную опасность пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров, разработаны заливочные пенопласты с пониженной пожарной опасностью и высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: горючесть; дымообразующая способность; концентрация фосфора; кислородный индекс; плотность; пиролиз; тепловой поток; термостойкость

Для цитирования: *Ушков В.А., Горюнова А.В., Золотарев М.Е., Ушков М.В.* Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 41–53. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.41-53

✉ *Ушков Валентин Анатольевич*, e-mail: VA.ushkov@yandex.ru

Influence of phosphorus-containing flame retardants on fire hazard indices of gas-filled polymers based on reactive oligomers

Valentin A. Ushkov ✉, Anna V. Goryunova, Mikhail E. Zolotarev, Maksim V. Ushkov

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

ABSTRACT

Introduction. The reduction of flammability of gas-filled polymers prone to carbonization is based on the use of phosphorus- and boron-containing compounds that reduce the formation of combustible volatile pyroly-

© *В.А. Ушков, А.В. Горюнова, М.Е. Золотарев, М.В. Ушков, 2023*

sis products and increase the yield of coke residue. This reduces the rate of heat release, heat and mass transfer between the material and the flame. In the scientific literature the data about the influence of phosphorus-containing flame retardants on thermal stability, combustibility and smokeability of foams are given, but there are no data about the influence of phosphorus concentration on fire danger indicators of foams. The aim of this paper is the development of effective methods of production of casting foams based on reactive oligomers with low fire hazard and high-performance. Objectives: to reveal the influence of phosphorus concentration on the technological and physical-mechanical characteristics, thermal resistance and fire hazard indices of foams and to develop fire-proof thermal insulation materials possessing high performance.

Methods. Physical-mechanical properties and fire hazard indices of gas-filled polymers were determined according to current GOST. Thermal properties and composition of combustion products of foams have been studied with thermoanalytical complex DuPONT-9900 and chromatography-mass spectrometry.

Results and discussion. The concentration of phosphorus in the synthesis of rigid polyurethane foams with reduced flammability and high performance should exceed 2.1 % wt. The low-combustible urea foams have been obtained at a phosphorus concentration of 0.2–0.3 % wt. For the production of non-flammable, low-flammable resin foams, the phosphorus concentration is 0.6–0.7 % wt. At the same time, organophosphorus flame retardants containing reactive groups are highly effective.

Conclusions. As a result of experimental studies the influence of phosphorus concentration and content of organophosphorus-containing flame retardants on physical-mechanical properties, thermal stability and fire hazard of foams based on reactive oligomers was revealed, the pouring foams with lowered fire hazard and high performance were developed.

Keywords: flammability; smokeability; phosphorus concentration; oxygenation index; density; pyrolysis; heat flux; thermal resistance

For citation: Ushkov V.A., Goryunova A.V., Zolotarev M.E., Ushkov M.V. Influence of phosphorus-containing flame retardants on fire hazard indices of gas-filled polymers based on reactive oligomers. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):41-53. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.41-53 (rus).

✉ *Valentin Anatolevich Ushkov,* e-mail: VA.ushkov@yandex.ru

Введение

Повышение энергосбережения и энергоэффективности в строительной индустрии является ключевой проблемой российской экономики. Это особенно актуально при возведении и ремонте жилых, гражданских и промышленных зданий и сооружений. Ежегодные тепловые потери при транспортировке теплоносителя превышают 26,4 % от суммарной тепловой энергии, вырабатываемой за год, а изношенность тепловых сетей превышает 90 % [1]. Жесткие нормативы к тепловой изоляции привели к использованию более эффективных теплоизоляционных материалов — пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров [2–6]. Прочностные и теплофизические характеристики пенопластов зависят от особенностей ячеистой структуры полимерных пен и, следовательно, от химического строения полимерной матрицы и природы дисперсной фазы [7–9]. Влияние химической природы полимерной матрицы и особенностей ячеистой структуры пенопластов на термические свойства и скорость распространения пламени по их поверхности рассмотрено в работах [10, 11].

В строительной индустрии широко используют заливочные резольные пенофенопласты (ПФП), жесткие пенополиуретаны (ППУ) и карбамидные пенопласты (КФП) [2–6]. Однако повышенная пожарная опасность промышленных марок заливочных пенопластов сдерживает их более широкое применение в строительстве: они, как правило, относятся к горючим материалам с высокой дымообразующей способностью [12]. Термические свойства и воспламеняемость заливочных пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров представлены в табл. 1 [13]. Среди указанных пенопластов резольные ПФП относятся к умеренно- или слабогорючим материалам в зависимости от их кажущейся плотности. Они обладают низкой дымообразующей способностью (максимальная удельная оптическая плотность дыма D_{max} при испытании по ГОСТ 24632–81 не превышает 35) [11]. В то же время ПФП склонны к тлению (температура тления $T_{тл}$ пенофенопластов составляет 265–340 °С) [14, 15].

Уменьшение горючести полимерных материалов на основе коксующихся полимеров достигается чаще всего применением фосфор-, фосфоразот- или борсодержащих антипиренов различного химического строения [16, 17]. Так, например, при введении в состав исходной композиции до 10 % масс. азотфосфорсодержащего антипирена кислородный индекс ППУ возрастает до 27 % [18]. Снижение горючести фосфорсодержащих ППУ происходит за счет увеличения карбонизации материала (коксовый остаток возрастает до 35,6 %), снижения скорости и суммарного тепловыделения при горении газообразных продуктов разложения пенопластов [19]. Одновременно уменьшается термостойкость фосфорсодержащих пен ($T_{нр}$ снижается с 228 до 209 °С).

Для снижения горючести жестких ППУ используют микрокапсулированный фосфор [20], полифосфат аммония [21, 22] или диметилметилфосфонат

Таблица 1. Термостойкость и воспламеняемость заливочных пенопластов
Table 1. Thermal resistance and flammability of foamed grades based on reactive oligomers

Показатели Indicators	Марка пенопласта Foam type		
	ПФП PF	КФП UF	ППУ PUR
Температура, °С: Temperature, °С:			
● начала интенсивного разложения $T_{нр}$ ● the beginning of intensive decomposition T_{bd};	249–371	175–195	190–210
● максимальной скорости разложения T_{max} ● maximum decomposition rate T_{max};	485–508	258–274	240–360
● воспламенения $T_{в}$ ● ignition T_i;	470–500	240–260	235–255
● самовоспламенения $T_{св}$ ● self-ignition T_{si}	540–600	440–470	435–530
Кислородный индекс (КИ), % Oxygenation index (OI), %	33,4–44,1	29,3–32,8	20,8–24,6
Минимальная концентрация кислорода для распространения пламени по горизонтальной поверхности пенопластов $c_{пр}$, % Minimum oxygen concentration for flame propagation over a horizontal surface of foamed plastics c_l, %	35,1–47,1	29,8–33,2	24,8–26,1
Плотность теплового потока воспламенения $q_{кр}$, кВт/м^2 Critical ignition heat flux density q_{cr}, kW/m^2	29,5–41,6	21,1–35,6	14,7–29,5

(ДММФ) [23]. КИ ППУ, содержащих до 15 % масс. ДММФ, возрастает с 19,2 до 23,7 %. Следует отметить, что при содержании указанного антипирена более 15 % масс. увеличивается технологическая усадка ППУ и снижаются их физико-механические характеристики [23]. Фосфорсодержащие антипирены применяют в сочетании со вспененным графитом или меламином [21, 24], тонкоизмельченными металлургическими шлаками [22], волокнами углерода [21, 25]. При сочетании полифосфата аммония со вспененным графитом КИ пенопластов достигает 34,5 % [21]. Модификация ППУ фитатом пиперазина повышает термостойкость пен и выход коксового остатка до 25,8 % при 700 °С [26]. Одновременно снижаются тепловыделение и дымообразующая способность при горении ППУ, уменьшается концентрация токсичных (изоцианатов, ароматических соединений, CO и HCN) и горючих летучих продуктов пиролиза, а также образуется плотный коксовый слой на их поверхности [26].

Учитывая, что при содержании аддитивных фосфорсодержащих антипиренов более 15 % масс. ухудшаются технологические свойства и уменьшаются эксплуатационные характеристики ППУ, для снижения воспламеняемости и горючести указанных пенопластов используют фосфор- и борсодержащие полиолы различного химического строения [19, 27–29]. Так, например, использование простых гидроксилсодержащих олигоэфиров, содержащих 1,3,5-триазиновые циклы и атомы бора, не только снижает горючесть ППУ, но и повышает их термостойкость [27]. Весьма перспективным направлением снижения пожарной опасности ППУ является создание гибридных систем на основе полиуретанов и неорганических аэрогелей [30]. Однако чаще всего для этих целей применяют фосфорсодержащие полиолы [19, 28, 29, 31].

Для снижения горючести и склонности резольных ПФП к тлению рекомендуют применять фосфорсодержащие соединения [13, 15, 31, 32]. Например, для уменьшения горючести фенопластов предложено использовать полифосфат аммония в сочетании с пентаэритритом и оксидом молибдена: КИ композитов возрастает на 73 % [32]. При этом существенное влияние на скорость тепловыделения и состав газообразных продуктов горения оказывает MoO_3, который при оптимальном содержании (1,5 % масс.) снижает на 75 % скорость тепловыделения и уменьшает, соответственно, на 28 и 41 % концентрацию CO и CO_2 в продуктах горения фенопластов [32]. Для снижения горючести ПФП проводят также модификацию фенолформальдегидных смол резорцином [33]. Однако указанные соединения незначительно влияют на $T_{тл}$ пенофенопластов.

Таким образом, в научно-технической литературе практически отсутствуют данные о влиянии концентрации фосфора [p] в материале на показатели пожарной опасности пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров. Поэтому в настоящей работе при разработке научно-обоснованных методов получения заливочных строительных пенопластов с пониженной пожарной опасностью необходимо было выявить влияние [p] в пенопластах на показатели термостойкости и пожарной опасности жестких ППУ, резольных ПФП и КФП, обосновать выбор эффективных антипиренов и определить оптималь-

ную [р] для получения газонаполненных полимеров, обладающих пониженной пожарной опасностью, высокими технологическими и эксплуатационными показателями.

Материалы и методы

Жесткие ППУ получали на основе простых оксипропилированных полиолов марок Лапрол-503 и Лапрол-805 (ТУ 226-009-10488057–94) и полиизоцианата (ТУ 2472-002-72311668–2004). В качестве катализаторов вспенивания и отвержения и вспенивающего агента использовали, соответственно, смесь азотсодержащего полиола марки Лапромол-294 (ТУ 226-010-10488057–94) с диметилэтаноламином (ТУ 2423-004-78722668–2010) и смесь хладона-11 (ТУ 6-02-727–78) и воды (ГОСТ 23732–2011) [11, 28]. Резольные ПФП синтезировали на основе форполимера марки ФРВ-1А (ТУ 6-05-1104–78) и продукта ВАГ-3 (ТУ 2257-008-58948815–2003) [11, 13, 15]. Заливочные КФП получали на основе карбамидной смолы марки КФ-МТ (ГОСТ 14231–88), ПАВ (ОП-10, ГОСТ 8433–81) и вспенивающего агента (хладон-11 или и-пентан, ГОСТ 24676–2017). Отверждение карбамидных пенопластов проводили с помощью 25%-ного водного раствора о-фосфорной кислоты (ГОСТ 10678–76).

При разработке умеренно горючих жестких ППУ в качестве фосфорсодержащего полиола применяли оксиэтилированный тетраалкилфосфонат пентаэритрита (фостетрол-1, ТУ 2226-009-10488057–94, [р] = 14,7 %) [11, 28]. Для снижения горючести КФП и склонности к тлению резольных ПФП использовали неорганические фосфаты ($NH_4H_2PO_4$ и $(NH_4)_2HPO_4$, ГОСТ 8515–75), полифосфат аммония (ТУ 6-47-15–90, [р] > 31 %) и микрокапсулированный полифосфат аммония с диаметром частиц 40–150 мкм, содержащий в качестве оболочки микрокапсул сополимер стирола с N-трибромфенилмалеинимидом, а также промышленные марки фосфатных пластификаторов [трикрезилфосфат (ГОСТ 5728–76, [р] = 9,6 %), дифенилизобутилфенилфосфат (ТУ 6-05-211-1211–80, [р] = 8,42 %) и трихлорпропилфосфат (ТУ 2493-513-05763441–2007, [р] = 9,47 %)], трианилидофосфат ([р] = 9,5 %), диамид метилфосфоновой кислоты ([р] = 11,6 %, ТУ 6-02-3-213–84) и поли(1,4-фениленфенилфосфонат), содержащий 13,4 % фосфора. В качестве реакционноспособных антипиренов применяли фосфорорганические соединения (ФОС), содержащие гидроксильные (фосдиол, [р] = 15,5 % и фостерол-1) или метакрилатные (2-фосфоноксиэтилметакрилат — ФЭМ, [р] = 14,3 % и фосфакрилат, [р] = 10,1 %) группы [13, 15].

Термические свойства заливочных пенопластов определяли с помощью термоаналитического комплекса DuPONT-9900 при нагревании образцов на воздухе со скоростью 10 и 20 °С/мин с учетом требований ГОСТ Р 53293–2009 [11]. Критериями термостойкости исследованных пен являются температура начала интенсивного разложения $T_{нр}$ и максимальной скорости разложения T_{max} [11]. КИ, $T_{тл}$, $T_{в}$, $T_{св}$, $q_{кр}$ и коэффициент дымообразования D_m в режимах пиролиза и пламенного горения пенопластов определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.044–89, а D_{max} — по ГОСТ 24632–81. Минимальную концентрацию кислорода и скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности пенопластов изучали по методике работы [10]. Горючесть фосфорсодержащих пенопластов определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 30244–94. Состав газообразных продуктов горения исследуемых пенопластов изучали с помощью хромато-масс-спектрометра LKB. Технологические и физико-механические характеристики разработанных фосфорсодержащих пенопластов определяли по действующим ГОСТам [13].

Результаты и их обсуждение

Разложение и горение резольных ПФП, КФП и жестких ППУ сопровождаются образованием токсичных газообразных продуктов. Например, масс-спектрометрически в летучих продуктах пиролиза и горения жестких ППУ обнаружен метан, этан, пропан, этилен, пропилен, оксид этилена, трихлорфторметан, бензол, толуол, CO, CO_2, HCN и другие летучие соединения. Образование CO и CO_2 при разложении жестких ППУ обусловлено распадом уретановых групп, протекающих по радикальному механизму: максимальное образование CO_2 наблюдается при 700 °С, а CO — при 800 °С [11, 13]. Высокая токсичность газообразных продуктов пиролиза жестких ППУ связана с высокой концентрацией HCN [18, 27].

При высокотемпературном разложении резольных ПФП образуются оксиды углерода и азота, HCN, H_2O, формальдегид, бензол, толуол и фенол, другие углеродсодержащие соединения. Высокая токсичность летучих продуктов пиролиза пенофенопластов обусловлена высокой концентрацией CO (338–700 мг/г), оказывающей преобладающий вклад в общетоксический эффект газообразных продуктов. При этом максимальное образование CO (670–700 мг/г) наблюдается при нагревании ПФП в пиролизе замкнутого типа при температуре 525 °С, а CO_2 (392–520 м/г) — при 720 °С [11]. При динамическом нагреве ПФП при 600 °С выход CO и CO_2 составляет 1,5–2,0 и 5,9–7,0 % об. соответственно, а HCN — 71,72 мг/г. Основными продуктами флеш-пиролиза указанного пенопласта являются фенол, H_2O, метан, CO и CO_2, концентра-

ция которых возрастает с ростом температуры разложения. Резольные пенофенопласты по токсичности продуктов пиролиза и горения относятся к высокоопасным материалам [13]. Суммарное образование оксидов углерода при пиролизе пенопласта марки ФРП-1 превышает в 1,5–2 раза жесткий ППУ.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что увеличение [р] в ППУ до 4 % масс. приводит к повышению КИ, $T_в$ и $T_{св}$, соответственно, до 29,3 %, на 100–105 и 75–80 °С, снижению $T_{нр}$ с 210 до 182 °С (рис. 1). При испытаниях по ГОСТ 30244–94 жесткие ППУ отнесены к слабогорючим материалам при КИ > 29 %, а к умеренногорючим материалам — при 26 % < КИ < 29 %. Для получения умеренногорючих жестких ППУ [р] в пенопласте должна превышать 2,1 % масс. (содержание фостетрол-1 в полиэфирной смеси достигает 70 %). Следует отметить, что для низкотемпературной тепловой изоляции из жестких ППУ предъявляются жесткие требования по их увлажнению. Потому [р] в пенопластах не должна превышать 3 % масс. Значения D_{max} в режимах пиролиза и пламенного горения исходного ППУ близки, что обусловлено образованием одинакового количества сажеобразующих продуктов. Учитывая, что склонность низкомолекулярных углеводородов к сажеобразованию возрастает при снижении [O_2] в окислителе, можно предположить, что при определении D_{max} фосфорсодержащих ППУ будет возрастать неполнота сгорания продуктов их разложения, что и приводит к росту дымообразующей способности пенопластов [28]. С ростом [р] в жестких ППУ в режиме пламенного горения возрастает D_{max} с 115 до 230–245, а в режиме пиролиза практически не зависит от его концентрации (рис. 1). При испытании по ГОСТ 12.1.044–89 коэффициент дымообразования ППУ в режимах пламенного горения и пиролиза равен, соответственно, 870–950 и 580–650 кг/м^2 [13].

Состав летучих продуктов флеш-пиролиза жестких ППУ незначительно зависит от [р] в пенопласте: наблюдается небольшое снижение концентрации CO, предельных и непредельных углеводородов и рост концентрации CO_2 и метана в продуктах высокотемпературного разложения ППУ [28]. Масс-спектральный анализ состава продуктов горения фосфорсодержащих ППУ показал, что увеличение [р] в пенопласте способствует резкому уменьшению концентрации CO_2 и повышению концентрации H_2O, предельных и непредельных углеводородов, а максимальная концентрация оксидов углерода образуется на 8–9 мин эксперимента. При этом состав летучих продуктов флеш-пиролиза

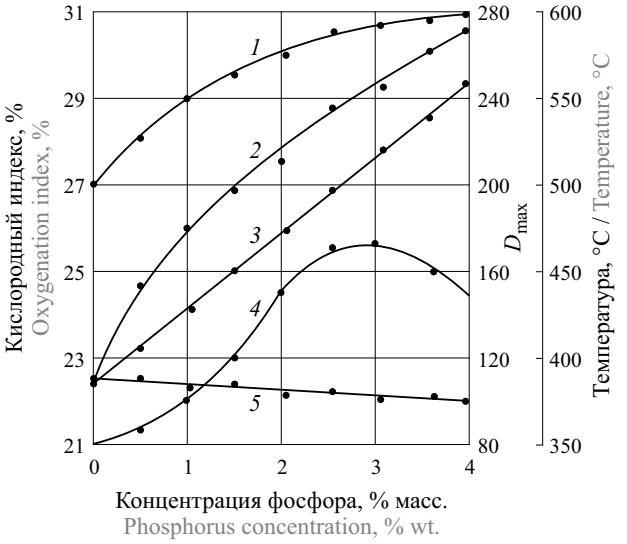


Рис. 1. Зависимость показателей пожарной опасности жестких ППУ от концентрации фосфора в пенопласте: *1* — температура самовоспламенения; *2* — D_{max} в режиме пламенного горения; *3* — кислородный индекс; *4* — температура воспламенения; *5* — D_{max} в режиме пиролиза

Fig. 1. Dependence of fire hazard indicators of rigid PUR on the phosphorus concentration in the foam: *1* — self-ignition temperature; *2* — D_{max} in the flame combustion mode; *3* — Oxygenation index; *4* — ignition temperature; *5* — D_{max} in the pyrolysis mode

исследованных ППУ существенно зависит от температуры пиролиза (табл. 2).

Методы синтеза карбамидных олигомеров, химическая природа вспенивающего агента и способ получения КФП практически не влияют на термостойкость пенопластов: $T_{нр}$ пенопласта марки МФП-3 (воздушно-механическое вспенивание) и КФП на основе смолы марки КФ-МТ (физическое вспенивание) составляют, соответственно, 185 и 175 °С, а T_{max} всех исследованных КФП равно 260 °С [31]. С повышением плотности КФП с 48,5 до 154,3 кг/м^3 КИ и $c_{пр}$ возрастают с 29,4 и 30,1 до 33,2 %, а $V_{рп}$ при [O_2] в потоке окислителя, равной 35 %, линейно снижается с 1,78 до 0,6 мм/с. Для карбамидных пенопластов минимальная [O_2] при распространении пламени по горизонтальной и вертикальной поверхностям составляет 30,6–32,7 %. Использование в качестве вспенивающего агента изопентана повышает горючесть (КИ снижается с 41 до 39 %) пенопластов.

Химическое строение фосфорсодержащих антипиренов практически не влияет на воспламеняемость и горючесть КФП ($T_в$ и $T_{св}$ равны 285–305 и 460–470 °С соответственно, а КИ = 39,3–41,2 %), но оказывает существенное влияние на образование газообразных продуктов высокотемпературного разложения КФП (табл. 3). Потеря массы КФП при повышенных температурах (73–78 % при 450 °С и 84–88 % при 600 °С) также практически не зависит от хими-

Таблица 2. Состав газообразных продуктов высокотемпературного разложения фосфорсодержащих ППУ
Table 2. Composition of gaseous products of high-temperature decomposition of phosphorus-containing PUR

Летучие продукты пиролиза, % Volatile products of pyrolysis, %	Концентрация фосфора, % масс. Phosphorus concentration, % wt.			
	0	2,04	2,55	3,06
Оксид углерода Carbon monoxide	0,45 / 2,35	0,5 / 2,54	0,37 / 2,44	0,38 / 2,42
Диоксид углерода Carbon dioxide	1,79 / 4,36	1,93 / 4,81	1,8 / 4,69	1,81 / 4,55
Пары воды Water vapor	0,55 / 1	0,44 / 0,86	0,61 / 0,97	0,51 / 0,79
Метан / Methane	0,15 / 1,29	0,11 / 1,38	0,11 / 1,40	0,07 / 1,22
Этилен / Ethylene	0,09 / 1,27	0,1 / 1,24	0,06 / 0,17	0,06 / 0,35
Этан / Ethane	0,02 / 0,09	– / 0,07	следы trace / 0,02	следы trace / 0,08
Пропилен Propylene	0,27 / 0,35	0,2 / 0,19	0,22 / 0,31	0,22 / 0,22
Цианистый водород (при 700 °С) Hydrogen cyanide (at 700 °С)	0,009	0,029	0,028	0,035

Примечание: в числителе — пиролиз при 400 °С, в знаменателе — при 700 °С.
Note: in the numerator at 400 °С, in the denominator at 700 °С.

ческого строения и содержания исследованных антипиренов. С ростом концентрации фосфорсодержащих антипиренов (до 3 % масс.) закономерно снижаются воспламеняемость и горючесть карбамидных пенопластов: КИ возрастает с 34 до 39,3–40,5 % (рис. 2), а $T_в$ и $T_{св}$ повышается соответственно с 240 и 450 °С до 305–320 и 465–485 °С (рис. 3). Для производства пенопластов с пониженной токсичностью продуктов горения следует использовать диаммоний фосфат: наблюдается уменьшение выхода CO и CO_2 при разложении КФП с ростом концентрации $(NH_4)_2HPO_4$. Следует отметить, что с ростом содержания исследованных антипиренов снижается и термостойкость карбамидных пенопластов. Так, например, повышение концентрации $(NH_4)_2PO_4$ до 3 % масс. уменьшает $T_{нр}$ и T_{max} КФП, вспененных хладоном-11, соответственно, до 165 и 250 °С [31].

Таблица 3. Горючесть фосфорсодержащих карбамидных пенопластов
Table 3. Flammability of phosphorus-containing urea foams

Антипирен Fire retardant	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Температура, °С Temperature, °С		Кислородный индекс, % Oxygenation index, %
		Воспламенения Flammability	Самовоспламенения Self-ignition	
Диаммоний фосфат Diammonium phosphate	109	285	460	39,3
Полифосфат аммония Ammonium polyphosphate	124	300	465	40,1
Микрокапсулированный полифосфат аммония Microencapsulated ammonium polyphosphate	138	290	490	39,8
Трикрезилфосфат Tricresylphosphate	134	300	470	40,5
Дифенил (изобутилфенил) — фосфат Diphenyl (isobutylphenyl) — phosphate	130	305	465	41,2
Диамид метилфосфоновой кислоты Methylphosphonic acid diamide	132	305	465	40,0

Примечание: содержание антипирена равно 1 % масс. [13].
Note: The flame retardant content is 1 % wt. [13].

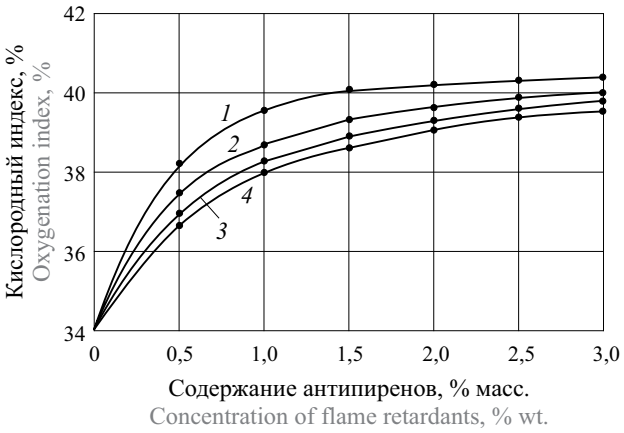


Рис. 2. Зависимость кислородного индекса КФП от содержания антипиренов: *1* — микрокапсулированный полифосфат аммония; *2* — диаммоний фосфат; *3* — ФЭМ; *4* — трикрезилфосфат
Fig. 2. Dependence of oxygenation index of UF on flame retardant composition: *1* — microencapsulated ammonium polyphosphate; *2* — diammonium phosphate; *3* — PEM; *4* — tricresyl phosphate

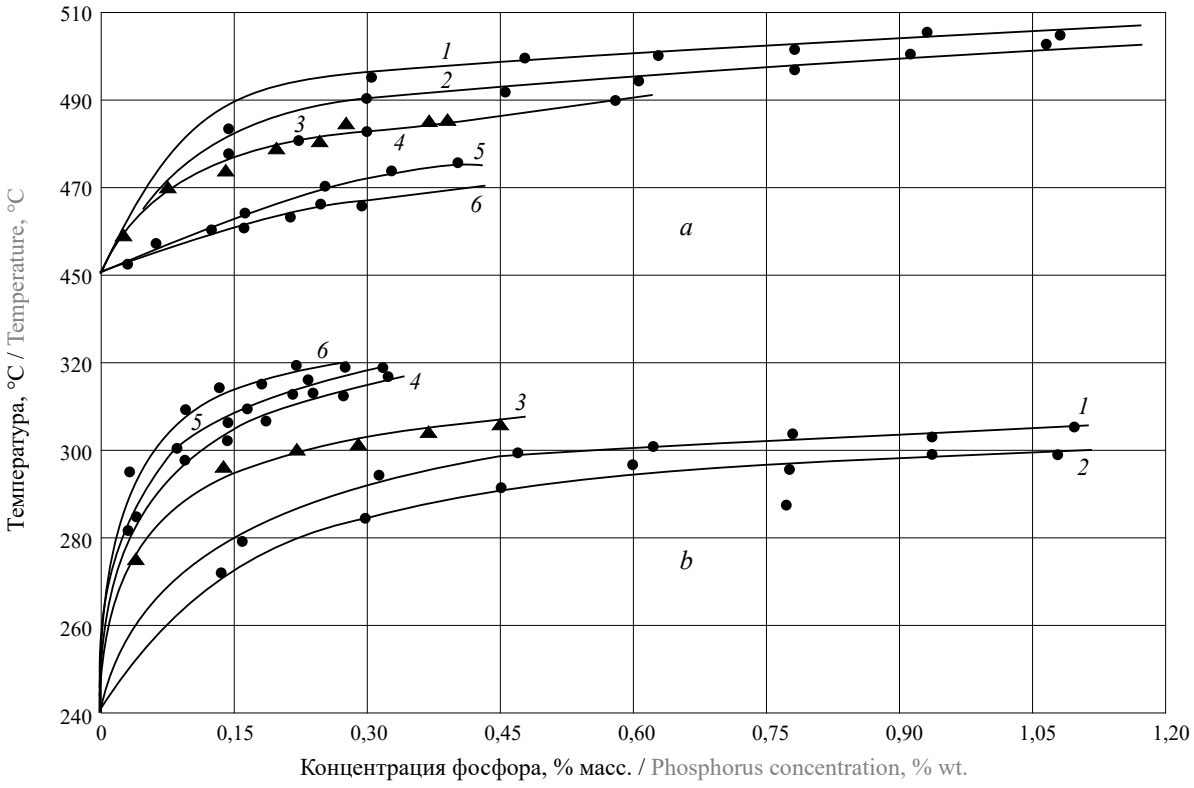


Рис. 3. Зависимость $T_{св}$ (*a*) и $T_{в}$ (*b*) КФП от [p] в материале: *1* — полиаммоний фосфат; *2* — микрокапсулированный полифосфат аммония; *3* — фостетрол-1; *4* — трианилидофосфат; *5* — ФЭМ (2-фосфоноксиэтилметакрилат); *6* — дифенилизобутилфенилфосфат
Fig. 3. Dependence of self-ignition temperature (*a*) and ignition temperature (*b*) of urea foams on the concentration of phosphorus in the material: *1* — poly ammonium phosphate; *2* — microencapsulated ammonium polyphosphate; *3* — phostetrol-1; *4* — trianilido phosphate; *5* — PEM (2-phosphonoxyethyl methacrylate); *6* — diphenyl isobutyl phenyl phosphate

Слабогорючие КФП с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками получены при концентрации исследованных антипиренов 1,5–2,0 % масс. ([p] = 0,2–0,3 %). При более высоком содержании они увеличивают индукционный период и продолжительность вспенивания композиций, повышают плотность заливочных КФП. Это обусловлено применением водного раствора ортофосфорной кислоты в качестве отверждающего агента при синтезе заливочных КФП.

Концентрация CO и CO_2 в продуктах пиролиза слабогорючих КФП, модифицированных $(NH_4)_2HPO_4$ (2 % масс.), при 450 °C и 600 °C не превышает 13 и 224, 76,8 и 538 мг/г соответственно. Это значительно меньше концентрации CO и CO_2 в продуктах пиролиза промышленных марок пенофенопластов. Так, например, концентрация CO и CO_2 в продуктах разложения ПФП марки Виларес 400 достигает 614 и 1147 мг/г при 450 °C и 358 и 840 мг/г при 600 °C.

Результаты экспериментальных исследований показали, что аддитивные ФОС являются малоэффективными антипиренами для резольных ПФП. Так, например, полифениленфенилфосфонат выполняет роль негорючего наполнителя: КИ пенофено-

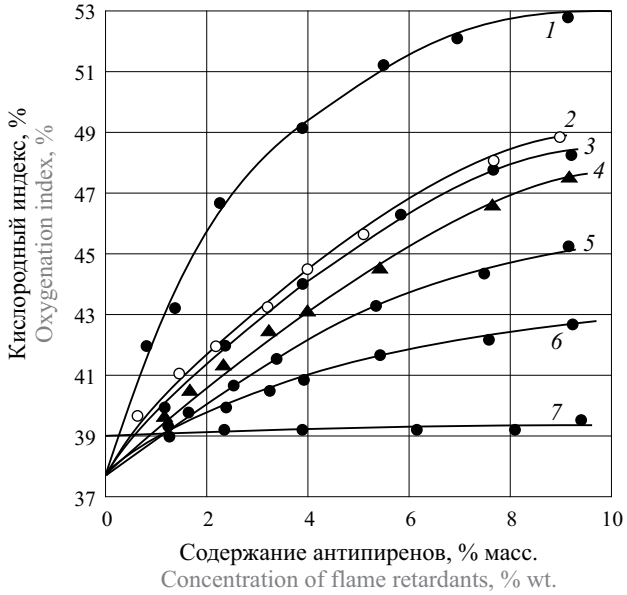


Рис. 4. Зависимость кислородного индекса резольных ПФП от содержания ФОС: *1* — трихлорпропилфосфат; *2* — фосдиол; *3* — полифениленфенилфосфонат; *4* — фостетрол-1; *5* — 2-фофоноксиэтилметакрилат; *6* — фосфакрилат; *7* — трианилидофосфат
Fig. 4. Dependence of the oxygenation index of resole phenolic foam PF on the phosphate content: *1* — trichloropropyl phosphate; *2* — phosdiol; *3* — polyphenyl phenyl phosphonate; *4* — phostetrol-1; *5* — 2-phosphon oxyethyl methacrylate; *6* — phosphacrylate; *7* — trianilido phosphate

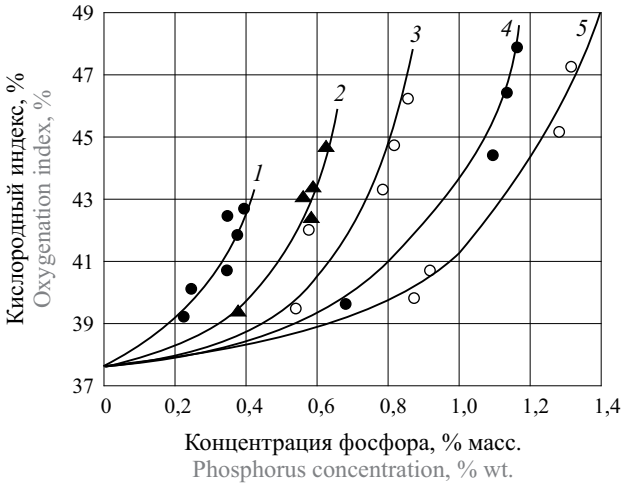


Рис. 5. Зависимость кислородного индекса резольных пенофенопластов от концентрации фосфора в материале при различном содержании ФОС: *1* — 2,5 % масс.; *2* — 4,0 % масс.; *3* — 5,5 % масс.; *4* — 7,5 % масс.; *5* — 9 % масс.

Fig. 5. The dependence of the oxygenation index of resole phenolic foams on the concentration of phosphorus in the material at different phosphorus concentrations: *1* — 2.5 % wt.; *2* — 4.0 % wt.; *3* — 5.5 % wt.; *4* — 7.5 % wt.; *5* — 9 % wt.

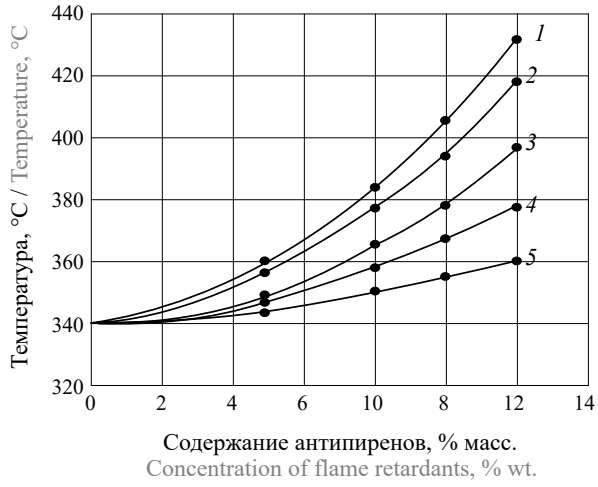


Рис. 6. Зависимость температур тления ПФП от содержания фосфорорганических соединений: *1* — фосдиол; *2* — фостетрол; *3* — 2-фосфоноксиэтилентетакрилат; *4* — фосфакрилат; *5* — трианилидофосфат

Fig. 6. Dependence of the PF smoldering temperatures on the concentration of organophosphorus compounds: *1* — phosdiol; *2* — phostetrol; *3* — 2-phosphate oxyethylene methacrylate; *4* — phosphacrylate; *5* — trianilidophosphate

пласта при его содержании 9,5 % масс. возрастает с 37,3 до 48,1 %, а трианилидофосфат повышает КИ пенофенопластов до 40 % (рис. 4). Более высокой эффективностью обладает трихлорпропилфосфат, при разложении которого образуется HCl, являющийся флегматизатором и ингибитором газофазных реакций в пламенах полимеров (КИ возрастает до 52,8 %). Диамид метилфосфоновой кислоты резко увеличивает выход CO при разложении пенопласта марки ФРП-1 в проточном пиролизе: при его содержании 7,7 масс. ч. концентрация CO повышается с 218–266 до 612 мг/г. При этом указанные соединения практически не влияют на термостойкость ПФП. Влияние [p] на величину КИ резольных пенофенопластов показано на рис. 5.

Для производства слабогорючих ПФП с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками следует использовать реакционноспособные ФОС, вступающие во взаимодействие с фенолформальдегидными олигомерами при их отверждении или образующие с ними взаимопроникающие пространственно-сетчатые полимеры в результате их полимеризации. ФОС, содержащие метакрилатные или

Таблица 4. Эксплуатационные свойства и горючесть разработанных заливочных строительных пенопластов
Table 4. Operational properties and flammability of the developed pouring construction foams

Показатели Indicators	Резольные ПФП Resole PF	ППУ PUR	КФП UF
Плотность, кг/м^3 Density, kg/m^3	65–75	43–50	130–150
Разрушающее напряжение, кПа, при: Destructive stress, kPa, at:			
• сжатии / compression;	100–120	260–280	700–1300
• изгибе / bending	100–110	210–230	800–1400
Температура, °С / Temperature, °С:			
• начала интенсивного разложения / at the beginning of intensive decomposition;	290–295 540–560	182–185 460–470	170–1300 295–310
• воспламенения / inflammation;			
• самовоспламенения / self-ignition;	>600	580–590	465–500
• тления / smolding	365–375	–	–
Кислородный индекс, % Oxygenation index, %	44,7–45,3	27,8–28,6	39,5–41,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) Thermal conductivity coefficient, W/(m·K)	0,035–0,038	0,030–0,032	0,041–0,045

гидроксильные группы, хорошо совмещаются с форполимером ФРВ-1А, незначительно влияют на кинетику вспенивания и отверждения пенопластов, повышают их прочность и качество теплоизоляционных изделий за счет более равномерного распределения температур по объему вспенивающейся массы [13, 15].

Реакционноспособные ФОС позволяют получать слабогорючие, не тлеющие после удаления пламени резольные пенофенопласты при их содержании 4–5,9 % масс. (концентрация фосфора 0,6–0,7 %): КИ изменяется в пределах 40,4–50,3 % (рис. 4, 5), а $T_{тл}$ составляет 365–385 °С (рис. 6). Применение ФЭМ, содержащего метакрилатные группы, повышает также на 25–30 °С теплостойкость ПФП и не оказывает влияния на термостойкость пен ($T_{нр}$ = 290–297 °С, T_{max} = 485–492 °С). Фосдиол и фостетрол-1, содержащие концевые гидроксильные группы, встраиваются в пространственно-сетчатую структуру резита в результате реакций сополиконденсации с участием метилольных ОН-групп и повышают образование карбонизованного остатка [13, 15].

При воздействии пламени наблюдается трансформация фосфорсодержащих соединений в структуру полифосфорных кислот. Эффективность ФОС во многом зависит от изменения характера пиролиза фенолформальдегидных полимеров: на начальной стадии наблюдается образование вязкотекучего расплава и его вспенивание перед переходом в твердое состояние. Подавление процесса тления пенофенопластов при использовании ФОС происходит за счет резкого снижения тепловыделения в результате снижения скорости и теплоты реакции окисления карбонизованного остатка [13, 15, 20]. Дополнительное применение $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ (4 % масс.) существенно уменьшает токсичность продуктов пиролиза резольных ПФП.

Таким образом, рациональное применение ФОС позволило авторам разработать умеренно- и слабогорючие заливочные газонаполненные полимеры на основе реакционноспособных олигомеров, обладающих высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками (табл. 4) [13].

Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено влияние [р] в материале на показатели пожарной опасности, технологические и физико-механические характеристики заливочных газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров. Выявлено, что при КИ > 26 % пенопласты относятся к умеренногорючим материалам, а при КИ > 29 % — к слабогорючим. Авторами разработаны заливочные жесткие ППУ, резольные ПФП и КФП с пониженной пожарной опасностью, обладающие высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками. Разработанные пенопласты целесообразно использовать в качестве тепловой изоляции трубопроводов и технологической аппаратуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Валгин В.Д.* Отечественная энергосберегающая технология теплоизоляции строительных конструкций с использованием пенопласта нового поколения // Пластические массы. 2007. № 10. С. 44–48.
2. *Клемпнер Д.* Полимерные пены и технологии вспенивания / пер. с англ. под ред. А.М. Чеботаря. СПб. : Профессия, 2009. 600 с.
3. *Кулешёв И.В., Торнер Р.В.* Теплоизоляция из вспененных полимеров. М. : Стройиздат, 1987. 144 с.
4. *Абдрахманова Л.А., Мубаракшина Л.Ф.* Оценка эксплуатационной стойкости усиленных карбамидных пенопластов // Строительные материалы. 2009. № 8. С. 38–39.
5. *Эванс Д.А.К.* Жесткий пеноплиуретан как теплоизоляционный материал для зданий с низким энергопотреблением // Полимерные материалы. 2013. № 3. С. 10–19.
6. *Панкрушин А.А.* Технологическая и экономическая целесообразность применения карбамидных пенопластов // Строительные материалы. 2004. № 5. С. 10–12.
7. *Дементьев А.Г., Тараканова О.Г.* Структура и свойства пенопластов. М. : Химия, 1983. 176 с.
8. *Гурьев В.В.* Влияние структурных особенностей теплоизоляционных материалов из газонаполненных пластмасс на их механические свойства // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 12. С. 19–23.
9. *Киселёв И.Я.* Теплофизические свойства пенопластов // Пластические массы 2003. № 6. С. 10–12.
10. *Ушков В.А., Лалаян В.М., Сокорева Е.В.* Распространение пламени по поверхности строительных пенопластов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. № 2. С. 23–27. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19435775
11. *Сокорева Е.В., Горюнова А.В., Ушков В.А.* Пожарная опасность газонаполненных полимеров // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 48–55. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30778543
12. *Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. изд. в 2-х кн. : кн. 2. М. : Химия, 1990, 384 с.

13. *Ушков В.А., Сокорева Е.В., Славин А.М., Орлова А.М.* Термостойкость и пожарная опасность строительных пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров // Строительные материалы. 2014. № 1. С. 28–32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17978029
14. *Константинова Н.И., Виноградов А.М., Бобков А.С.* Распространение тления в фенолоформальдегидных пенопластах // Пожарная профилактика : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1986. С. 93–103.
15. *Ушков В.А., Бруяко М.Г., Сокорева Е.В., Лалаян В.М.* Горючесть фосфорсодержащих резольных пенофенопластов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 11. С. 35–39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18642346
16. *Баратов А.Н., Андриянов Р.А., Корольченко А.Я., Михайлов Д.С. и др.* Пожарная опасность строительных материалов / под ред. А.Н. Баратова. М. : Стройиздат, 1988. С. 179–277.
17. *Михайлин Ю.А.* Тепло-, термо- и огнеопасность полимерных материалов. СПб. : Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
18. *Zhao Q., Chen C., Fan R., Yuan Y., Xing Y., Ma X.* Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foam with a nitrogen–phosphorus flame retardant // Journal of Fire Sciences. 2017. Vol. 35. Issue 2. Pp. 99–117. DOI: 10.1177/0734904116684363
19. *Gomez-Fernandez S., Ugarte L., Pena-Rodriguez C., Corcuera M.A., Eceiza A.* The effect of phosphorus containing polyol and layered double hydroxides on the properties of a castor oil based flexible polyurethane foam // Polymer Degradation and Stability. 2016. Vol. 132. Pp. 41–51. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.036
20. *Savas L.A., Deniz T.K., Tayfun U., Dogan M.* Effect of microcapsulated red phosphorus on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite&hydromagnesite mineral // Polymer Degradation and Stability. 2017. Vol. 135. Pp. 121–129. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.001
21. *Chen F., Sun W., Jiang J., Hu S., Shen Q., Zhang L.-M.* Preparation and flame retardant properties of ceramic polyurethane foam composite // Journal Wuhan University Technology. 2016. Vol. 38. Issue 4. Pp. 1–7.
22. *Yang S., Liu X., Tang G., Long H., Wang B., Zhang H. et al.* Fire retarded polyurethane foam composites based on steel slag/ammonium polyphosphate system: A novel strategy for utilization of metallurgical solid waste // Polymer Advanced Technology. 2022. Vol. 33. Issue 1. Pp. 452–463. DOI: 10.1002/pat.5529
23. *Sun C., Dong Z., Dong Y., Lu S. et al.* Effect of flame retardant dimethylmethylphosphonate on properties of rigid polyurethane foam // Plastic Science and Technology. 2017. Vol. 45. Issue 3. Pp. 90–94.
24. *Chan Y.Y., Ma C., Zhou F., Hu Y., Schartel B.* A liquid phosphorus flame retardant combined with expandable graphite or melamine in flexible polyurethane foam // Polymer Advanced Technology. 2022. Vol. 33. Issue 1. Pp. 326–339. DOI: 10.1002/pat.5519
25. *Zieleniewska M., Ryszkowska J., Bryskiewicz A., Auguszik M., Szczepkowski L., Swiderski A., Wrzesniewska-Tosik K.* The structure and properties of viscoelastic polyurethane foams with Fyrol™ and keratin fibers // Polymery. 2017. Vol. 62. Issue 2. Pp. 127–135. DOI: 10.14314/polimery.2017.127
26. *Yang S., Zhang B., Liu M., Yang Y., Xinliang L., Depeng C. et al.* Fire performance of piperazine phytate modified rigid polyurethane foam composites // Polymer Advanced Technology. 2021. Vol. 32. Issue 11. Pp. 4531–4546. DOI: 10.1002/pat.5454
27. *Chmiel E., Lubczak J.* Oligoetherols and polyurethane foams obtained from melamine diborate // Journal of Polymer Research. 2017. Vol. 24. Issue 6. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10965-017-1252-1
28. *Ушков В.А., Сокорева Е.В., Горюнова А.В., Демьяненко С.А.* Пожарная опасность фосфорсодержащих жестких заливочных пенополиуретанов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 12. С. 1524–1532. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1524-1532
29. *Сазонов О.О., Назимов А.А., Архипов Н.А., Сайфиева А.Р., Капралова В.М., Сударь Н.Т.* Исследование полиуретанов на основе фосфорорганических полиолов, модифицированных фталевым ангидридом // Вестник Казанского технологического университета. 2021. Т. 24. № 11. С. 66–69. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47231256
30. *Кобелев А.А., Круглов Е.Д., Асеева Р.М., Серпов Б.Б.* Гибридная полиуретано-неорганическая теплоизоляция: пожарная опасность и термоокислительное разложение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 8. С. 24–33. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-8-24-33
31. *Ушков В.А., Бруяко М.Г., Григорьева Г.С., Сокорева Е.В.* Термостойкость и горючесть строительных пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 344–348. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17978029
32. *Ma Yu-feng, Wang Chun-peng, Chu Fuxiang.* Effect of molybdenum trioxide on flame retardant properties of phenolic foams halogen-free system // Chemistry and Industry of forest Products. 2016. Vol. 36. Issue 3. Pp. 73–80.
33. *Liu J., Chen R.-Q., Xu Y.-Z., Wang C.-P., Chu F.-X.* Resorcinol in high solid phenol-formaldehyde resins for foams production // Journal Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134. Issue 22. DOI: 10.1002/app.44881

REFERENCES

1. Valgin V.D. The domestic energy-saving technology of thermal insulation of building structures with the use of a new generation of foam plastic. *Plastic masses*. 2007; 10:44-48. (rus).
2. Klempner D. *Polymer foams and foaming technology: Professiya* / profession, ed. by A.M. Chebotary. Saint Petersburg, 2009; 600. (rus).
3. Kuleshov I.V., Thorner R.V. *Thermal insulation of foamed polymers*. Moscow, Stroyizdat Publ.,1987; 144. (rus).
4. Abdrakhmanova L.A., Mubarakshina L.F. Assessment of operation durability of reinforced carbamide foam plastic. *Stroitel'nye materialy/Construction Materials*. 2009; 8:38-39. (rus).
5. Evans D.A.K. Rigid polyurethane foam as a thermal insulating material for buildings with low energy consumption. *Polymer materials. Products, equipment, technology*. 2013; 3: 10-19. (rus).
6. Pankrushin A.A. Technological and economic feasibility of urea foams. *Stroitelnye materialy/Construction Materials*. 2004; 5:10-12. (rus).
7. Dementiev A.G., Tarakanova O.G. Structure and properties of the foam plastics. *Khimiya/Chemistry*. Moscow, 1983; 176. (rus).
8. Guryev V.V. Influence of structural features of heat insulation materials from gas-filled plastics on their mechanical properties. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo/Industrial and Civil Engineering*. 2010; 12:19-23. (rus).
9. Kiselev I.Ya. Thermo-physical properties of foam plastics. *Plasticheskie massy/Plastic masses*. 2003; 6:10-12. (rus).
10. Ushkov V.A., Lalayan V.M., Sokoreva E.V. Spread of flame on the surface of construction polyfoams. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2013; 2:23-27. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19435775 (rus).
11. Sokoreva E.V., Goryunova A.V., Ushkov V.A. Fire hazard of gas-filled polymers // Safety of the construction fund of Russia. *Problems and Solutions*. 2017; 1:48-55. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30778543 (rus).
12. Baratov A.N., Korolchenko A.Y., Kravchuk G.N. et al. Fire and explosion safety of substances and materials and means for their extinguishing. *Chemistry, Reference Publisher*. In 2 Books: Book 2. Moscow, 1990; 384. (rus).
13. Ushkov V.A., Sokoreva E.V., Slavin A.M., Orlova A.M. Thermostability and combustibility of building polyfoams on the basis of reactive oligomers. *Building Materials*. 2014; 1:28-32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17978029 (rus).
14. Konstantinova N.I., Vinogradov A.M., Bobkov A.S. Spreading smoldering in phenol-formaldehyde foams. *Pozharnaya profilaktika/Fire prevention : Collection of scientific papers.* Moscow, VNIIPO, 1986; 93-103. (rus).
15. Ushkov V.A., Brujako M.G., Sokoreva E.V., Lalayan V.M. Combustibility of phosphorous-containing resol foam phenolplastics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(11):35-39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18642346 (rus).
16. Baratov A.N., Andriyanov R.A., Korolchenko A.Y., Mikhailov D.S. et al. *Fire hazard of building materials* / A.N. Baratov (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 179-277. (rus).
17. Mikhailin Y.A. *Heat-, thermo-, and fire hazard of polymeric material*. Saint Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2011; 416. (rus).
18. Zhao Q., Chen C., Fan R., Yuan Y., Xing Y., Ma X. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foam with a nitrogen–phosphorus flame retardant. *Journal of Fire Sciences*. 2017; 35(2):99-117. DOI: 10.1177/0734904116684363
19. Gomez-Fernandez S., Ugarte L., Pena-Rodriguez C., Corcuera M.A., Eceiza A. The effect of phosphorus containing polyol and layered double hydroxides on the properties of a castor oil based flexible polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*. 2016; 132:41-51. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.036
20. Savas L.A., Deniz T.K., Tayfun U., Dogan M. Effect of microcapsulated red phosphorus on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite&hydromagnesite mineral. *Polymer Degradation and Stability*. 2017; 135:121-129. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.001
21. Chen F., Sun W., Jiang J., Hu S., Shen Q., Zhang L.-M. Preparation and flame retardant properties of ceramic polyurethane foam composite. *Journal Wuhan University Technology*. 2016; 38(4):1-7.
22. Yang S., Liu X., Tang G., Long H., Wang B., Zhang H. et al. Fire retarded polyurethane foam composites based on steel slag/ammonium polyphosphate system: A novel strategy for utilization of metallurgical solid waste. *Polymer Advanced Technology*. 2022; 33(1):452-463. DOI: 10.1002/pat.5529
23. Sun C., Dong Z., Dong Y., Lu S. et al. Effect of flame retardant dimethylmethylphosphonate on properties of rigid polyurethane foam. *Plastic Science and Technology*. 2017; 45(3):90-94.
24. Chan Y.Y., Ma C., Zhou F., Hu Y., Schartel B. A liquid phosphorus flame retardant combined with expandable graphite or melamine in flexible polyurethane foam. *Polymer Advanced Technology*. 2022; 33(1):326-339. DOI: 10.1002/pat.5519
25. Zieleniewska M., Ryszkowska J., Bryskiewicz A., Auguszik M., Szczepkowski L., Swiderski A., Wrzesniewska-Tosik K. The structure and properties of viscoelastic polyurethane foams with Fyrol™ and keratin fibers. *Polymery.* 2017; 62(2):127-135. DOI: 10.14314/polimery.2017.127

26. Yang S., Zhang B., Liu M., Yang Y., Xinliang L., Depeng C. et al. Fire performance of piperazine phytate modified rigid polyurethane foam composites. *Polymer Advanced Technology*. 2021; 32(11):4531-4546. DOI: 10.1002/pat.5454
27. Chmiel Evelina, Lubczak Jacek. Oligoetherols and polyurethane foams obtained from melamine diborate. *Journal of Polymer Research*. 2017; 24(6):1-12. DOI: 10.1007/s10965-017-1252-1
28. Ushkov V.A., Sokoreva E.V., Gorynova A.V., Demyanenko S.A. Fire hazard of phosphorus-containing rigid polyurethane foams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2018; 13(12):1524-1532. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1524-1532 (rus).
29. Sazonov O.O., Nazimov A.A., Archipov N.A., Saifieva A.R., Kapralova V.M., Sudar' N.T. Study of polyurethanes based on phosphoroganic polyols modified with phthalic anhydride. *Vestnik Kazanskogo Technologicheskogo Universiteta/Bulletin of Kazan University of Technologies*. 2021; 24(11):66-69. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47231256 (rus).
30. Kobelev A.A., Kruglov E.D., Aseeva R.M., Serpov B.B. Hybrid polyurethane-inorganic thermal insulation: fire hazard and thermal-oxidative degradation. *Vse materialy. Encyclopedicheskii spravochnik*. 2021; 8:24-33. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-8-24-33 (rus).
31. Ushkov V.A., Bruyako M.G., Grigor'eva G.S., Sokoreva E.V. Thermostability and combustibility of building polyfoams on the basis of reactive oligomers. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2012; 5:344-348. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17978029 (rus.).
32. Ma Yu-feng, Wang Chun-peng, Chu Fuxiang. Effect of molybdenum trioxide on flame retardant properties of phenolic foams halogen-free system. *Chemistry and Industry of forest Products*. 2016; 36(3):73-80.
33. Liu Juan, Chen Ri-Qing, Xu Yu-Zhi, Wang Chun-Peng, Chu F.-X. Resorcinol in high solid phenol-formaldehyde resins for foams production. *Journal Applied Polymer Science*. 2017; 134(22). DOI: 10.1002/app.44881

Поступила 14.02.2023, после доработки 06.02.2023;
принята к публикации 17.04.2023
Received February 14, 2023; Received in revised form February 6, 2023;
Accepted April 17, 2023

Информация об авторах

УШКОВ Валентин Анатольевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией современные композиционные строительные материалы, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 676641; ORCID: 0000-0002-3002-9758; e-mail: VA.ushkov@yandex.ru

ГОРЮНОВА Анна Владимировна, преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 959741; ORCID: 0009-0009-8127-3070; e-mail: bony2401@yandex.ru

ЗОЛОТАРЕВ Михаил Евгеньевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1145182; ORCID: 0000-0003-4385-2177; e-mail: egaandmicha9@gmail.com

УШКОВ Максим Валентинович, преподаватель кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0003-0105-0560; e-mail: satory99@mail.ru

Information about the authors

Valentin A. USHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Modern Composite Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 676641; ORCID: 0000-0002-3002-9758; e-mail: VA.ushkov@yandex.ru

Anna V. GORYUNOVA, Lecturer of the Department of Design of Buildings and Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 959741; ORCID: 0009-0009-8127-3070; e-mail: bony2401@yandex.ru

Mikhail E. ZOLOTAREV, Postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1145182; ORCID: 0000-0003-4385-2177; e-mail: egaandmicha9@gmail.com

Maxim V. USHKOV, Lecturer of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-0105-0560; e-mail: satory99@mail.ru

Вклад авторов:

Ушков В.А. — *общее научное руководство выполненного исследования и интерпретация экспериментальных данных.*

Горюнова А.В. — *исследование влияния содержания фосфорсодержащего полиола на технологические, физико-механические и термические свойства и горючесть ППУ.*

Золотарев М.Е. — *исследование влияния химической природы и содержания фосфорорганических соединений на технологические, физико-механические и термические свойства и горючесть резольных пенофенопластов, обработка экспериментальных данных.*

Ушков М.В. — *исследование влияния химической природы и содержания антипиренов на технологические, физико-механические и термические свойства и горючесть заливочных карбамидных пенопластов.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution:

Valentin A. Ushkov — *general scientific management of the performed research and interpretation of experimental data.*

Anna V. Goryunova — *study of influence of phosphorus-containing polyol content on technological, physical-mechanical and thermal properties and flammability of polyurethane foam.*

Mikhail E. Zolotarev — *the influence of the chemical nature and the content of organophosphorus compounds on the technological, physical-mechanical and thermal properties and the flammability of resolved foams, the processing of experimental data.*

Maxim V. Ushkov — *Study of the Influence of the Chemical Nature and Content of Flame Retardants on the Technological, Physical and Mechanical Properties and Combustibility of Urea Cast Foam Plastics.*

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 54–68
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):54-68

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 699.81

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.54-68

Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров

Дарья Евгеньевна Шабунина[1]✉, Андрей Игоревич Данилов[1], Марина Викторовна Гравит[2]

[1] ООО «Центр исследований опасных факторов пожара», г. Кудрово, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Объемно-планировочные решения станций метрополитена влияют на удобство и безопасность пассажиров. Математическое моделирование является перспективным методом для решения задач, связанных с определением достаточности принятых объемно-планировочных решений станций в зависимости от пассажиропотока.

Цели и задачи. Цель исследования — обоснование метода математического моделирования пассажиропотоков для разработки оптимальных объемно-планировочных решений пересадочных станций метрополитена. Для достижения цели решены следующие задачи: разработка концепции типовой пересадочной станции метрополитена; моделирование пассажиропотока с исходными и оптимизированными объемно-планировочными решениями; моделирование эвакуации пассажиров со станции при возникновении пожара в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда.

Методы. В работе приведен метод математического моделирования для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена. В ПК Pathfinder разработана индивидуально-поточная модель пересадочной станции, по результатам которой произведено моделирование пассажиропотока с исходными и оптимизированными объемно-планировочными решениями. Для моделирования распространения опасных факторов пожара использовался ПК PyroSim.

Результаты и их обсуждение. По результатам математического моделирования определены оптимальные объемно-планировочные решения станций метрополитена, на основе которых выполнен сценарий эвакуации пассажиров. Получено, что в момент начала эвакуации на станции находится 3684 пассажира и 296 рабочих. Результаты моделирования показали, что общее расчетное время эвакуации из типовой пересадочной станции составляет 814 с. Также получено, что значения опасных факторов пожара в расчетных точках не достигают критических значений до момента завершения эвакуации.

Выводы. Разработана и реализована математическая модель типовой пересадочной станции для определения оптимальных объемно-планировочных решений и расчета безопасной эвакуации людей. На основе данного исследования в новой редакции СП 120.13330.2022 «Метрополитены» внесены изменения, определяющие, что расчетная численность пассажиров, эвакуирующихся со станции при пожаре, определяется на основе математического моделирования пассажиропотоков в час пик.

Ключевые слова: транспортно-пересадочные узлы; пропускная способность; индивидуально-поточная модель; безопасность; опасные факторы пожара; алгоритмы поведения пассажиров

Для цитирования: *Шабунина Д.Е., Данилов А.И., Гравит М.В.* Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 54–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.54-68

✉ *Шабунина Дарья Евгеньевна*, e-mail: shabunina@ciofp.ru

Method of mathematical modelling of passenger flows to justify the space-planning solutions of underground stations and calculate passenger evacuation

Daria E. Shabunina[1]✉, Andrey I. Danilov[1], Marina V. Gravit[2]

[1] LLC “Fire Hazard Research Center”, Kudrovo, Russian Federation

[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

 © Д.Е. Шабунина, А.И. Данилов, М.В. Гравит, 2023

ABSTRACT

Introduction. Space-planning solutions for underground stations have an effect on the comfort and safety of passengers. Mathematical modelling is a perspective method for solving problems dealing with the determination of adequacy of adopted space-planning solutions for stations depending on passenger traffic.

Aims and purposes. The purpose of the study is to justify the method of mathematical modelling of passenger flows to develop optimal space-planning solutions of interchange stations of underground. To achieve this goal, the following tasks were solved: the development of a model interchange station concept; modelling passenger flows with initial and optimized volume planning solutions; modelling of passenger evacuation from the station in case of fire in the basement of the arriving train's central carriage.

Methods. The paper presents a method of mathematical modelling to justify the space-planning solutions of underground stations. The software package Pathfinder developed an individual flow model of the interchange station, which simulated the passenger flows with initial and optimized volume-planning solutions. The software package PyroSim was used to simulate the spread of fire hazards.

Results and discussion. Based on the results of mathematical modelling, the optimal space-planning solutions for underground stations were determined, on the basis of which the passenger evacuation scenario was performed. It is obtained that there are 3,684 passengers and 296 workers at the station when the evacuation begins. The simulation results showed that the total estimated evacuation time from a typical transfer station is 814 seconds. It is obtained that the values of dangerous fire factors in the calculated points do not reach critical values until the evacuation is completed.

Conclusions. A mathematical model of a typical interchange station has been developed and implemented to determine the optimal space-planning solutions and calculate the safe evacuation of people. On the basis of this study in the new edition of the Code of Practice 120.13330.2022 "Underground" made amendments that determine that the estimated number of passengers evacuating from the station in case of fire, is based on mathematical modelling of passenger traffic during the rush hour.

Keywords: interchange hubs; capacity; individual-flow model; safety; fire hazards; passenger behavior algorithms

For citation: Shabunina D.E., Danilov A.I., Gravit M.V. Method of mathematical modelling of passenger flows to justify the space-planning solutions of underground stations and calculate passenger evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):54-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.54-68 (rus).

✉ *Daria Evgenievna Shabunina*, e-mail: shabunina@ciofp.ru

Введение

Метрополитен — вид городского транспорта, предназначенный для перевозки большого количества пассажиров в условиях плотной городской застройки. По сравнению с другими видами общественного транспорта метрополитен имеет отличительные характеристики, включающие высокую скорость, пропускную способность, своевременное обслуживание, уникальный процесс эвакуации, заключающийся в движении вверх, и однозначные маршруты (не подвержен влиянию других транспортных систем) [1]. Метрополитен рассматривается как сетевая система с пространственными топологическими отношениями, узлами которой являются станции, взаимодействующие друг с другом. Если загруженность вышерасположенной станции велика, то через некоторый промежуток времени загруженность нижерасположенной станции увеличится соответственно. Системы метрополитена большинства мегаполисов мира страдают от проблемы перегруженного пассажиропотока, особенно в часы пиковой загруженности в будние дни [2]. Прогнозирование пассажиропотоков городского транспорта практически важно для решения многих реальных задач, включая управление транспортом и общественную безопасность [3]. Московский метрополитен является четвертым в мире по загруженности и интенсивности использования (рис. 1) [4, 5]. При этом Московский метрополитен имеет сравнительно небольшую протяженность линий (405 км). На данный момент для равномерного распределения пассажиропотока в Москве строят новые линии и дополнительные пересадочные станции [6].

Пассажиропоток — движение пассажиров по определенной геометрии сети, определяемое как количество пассажиров, проходящих за единицу времени через геометрию транспортной сети [7, 8]. Пассажиропотоки имеют два основных фактора, которые необходимо определять: мощность потока и направление. Мощность пассажиропотоков — количество пассажиров, проезжающих за единицу времени через рассматриваемую геометрию транспортной сети. Так как пассажиропотоки в течение дня значительно колеблются (часы пиковой загруженности, межпиковый период), то в зависимости от мощности пассажиропотока определяется интервал движения поезда.

Ежедневно пассажиры метрополитена в час пик сталкиваются с большим количеством людей, высокой интенсивностью движения людских потоков в разных направлениях и повышенным уровнем шума [9]. Проектные решения станций метрополитена должны подвергаться анализу безопасного и комфортного нахождения пассажиров. При резком увеличении пассажиропотока в будущем существующие станции могут столкнуться с проблемой перенасыщения, если не будет изменена концепция принятия и анализа объемно-планировочных решений станций.

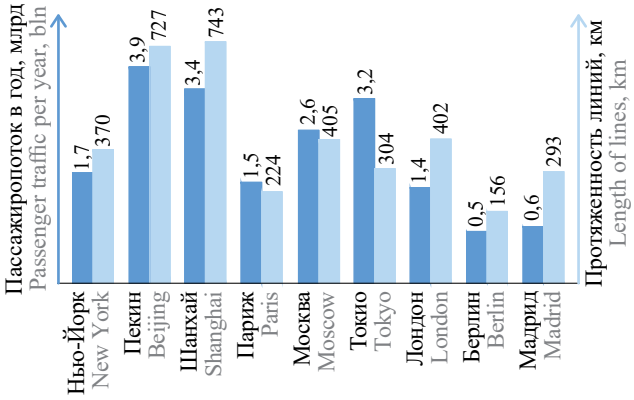


Рис. 1. Отношение протяженности линий метрополитена к количеству перевозимых пассажиров в год
Fig. 1. The ratio of the length of underground lines to the number of passengers transported per year

СП 120.13330.2012 «Метрополитены»[1] регламентирует объемно-планировочные решения станций метрополитена, включая ширину платформ, лестниц, количество эскалаторов и турникетов, пропускную и привозную способность станций метрополитена и количество вестибюлей и эвакуационных выходов. Федеральный закон № 123-ФЗ[2] регламентирует, что каждое здание или сооружение должно иметь объемно-планировочное решение, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей.

Для определения суммарного пассажиропотока в часы пик за интервал движения между поездами в СП 120.13330.2012 приводится формула:

$$П = П_{пут} + П_{вх} + П_{п}, \quad (1)$$

где $П_{пут}$ — пассажиропотоки соответственно для 1 или 2-го пути (принимается максимальный);

$П_{вх}$ — суммарный пассажиропоток входа с поверхности;

$П_{п}$ — пассажиропоток со смежной линии (для пересадочной станции).

Данная математическая модель для платформы станции позволяет определить суммарный пассажиропоток (чел/ч) за интервал между поездами, а не количество пассажиров (чел) по всем пассажирским зонам станционного комплекса (вестибюли, эскалаторы, платформы, переходы) в начальный момент времени эвакуации. Таким образом, СП 120.13330.2012 в силу простоты метода не учитывает реальную геометрию станций и скоростные характеристики людей в потоках, не позволяет определить достаточные исходные данные в зависимости от прогнозируемых пассажиропотоков для выполнения расчетов эвакуации людей при пожаре на станции метрополитена.

Для анализа пассажиропотока на пересадочных станциях метрополитена рассмотрены диссертационные работы, связанные с моделированием пассажиропотоков на станциях «Пушкинская» и «Площадь Восстания» (Россия, Санкт-Петербург) [10, 11]. Выявлено, что в течение часа пиковой загруженности происходит неравномерность входа пассажиров и распределения потока. В то же время СП 120.13330.2012 регламентирует, что пропускную способность, число входов и пассажирского подъемно-транспортного оборудования следует определять расчетом по величине 15-минутного пассажирского потока в часы пик с учетом коэффициента неравномерности распределения потока в течение одного часа, который равен 1,4 для пересадочной станции и 1,2 — для остальных станций.

Федеральный закон № 384-ФЗ[3] указывает, что соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности может быть обосновано исследованиями, моделированием, расчетами и испытаниями, выполненными по апробированным иным способом методикам.

Для точного прогнозирования пассажиропотоков в реальном времени в транспортно-пересадочных узлах применяются следующие методы: теоретический расчет, экспериментальное исследование, стратегия управления, вероятностный метод и математическое моделирование.

Теоретические расчеты используются в качестве метода для прогнозирования пассажиропотоков в метрополитене. Расчет времени эвакуации по теоретическому методу состоит из трех частей: расчет времени эвакуации в помещении с очагом пожара, на этаже с очагом пожара и в горящем здании. В статье [12] предлагается усовершенствованная формула расчета времени эвакуации на станции метрополитена. Этот метод делит зону эвакуации на различные этапы и показывает, превышает ли время эвакуации допустимые значения. Теоретический расчет учитывает время движения людей в стандартных условиях эксплуатации метрополитена, но не позволяет учесть зависимость плотности людского потока от скорости их движения, группы мобильности пассажиров, влияние объемно-планировочных решений станций (поворотов, ширины проходов, лестниц и эскалаторов) на скорость движения пассажиров.

Для получения исходных данных для проведения расчетов безопасной эвакуации в метрополитене, определения количества пар поездов в час и других параметров необходимо проведение экспериментальных исследований. В работе [13] методом экспериментального исследования измеряли темпе-

[1] СП 120.13330.2012. Метрополитены.

[2] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

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

ратуру в лондонском метрополитене для проверки численной модели; в работе [14] проведен эксперимент по изучению влияния тоннельной вентиляции на распространение опасных факторов пожара при возгораниях в тоннелях. Любые экспериментальные исследования на территории метрополитена являются достаточно требовательными к ресурсам (оборудование, пассажиры, время и пространство) и выполнимости. Таким образом, экспериментальное исследование оптимально проводить для валидации математических моделей и получения экспериментальных значений для задания алгоритмов в программных комплексах (ПК), необходимых для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров.

С целью прогнозирования пассажиропотоков, повышения эффективности работы и обеспечения безопасности пассажиров в развивающихся системах метрополитена применяется стратегия управления пассажиропотоками. Текущая стратегия обычно формулируется на основе субъективного опыта оперативного персонала на каждой станции. Неспособность работников метрополитена уловить взаимосвязь между пассажиропотоками на станции и на всей линии может вызвать повышенные скопления пассажиров на станциях, что может увеличить вероятность травмоопасных ситуаций и коллапса. В работе [15] предлагается метод управления пассажиропотоком на основе координации, использующий взаимосвязь станций и линий. Метод состоит из трех этапов: определение узких мест в метрополитене в соответствии с разницей между пассажиропотоком и пропускной способностью линии; исследование корреляции между пропускной способностью станции и пропускной способностью по проекту для точного устранения повышенных пассажиропотоков; разработка методики устранения узких мест, включающая в себя контролируемые станции и их способы контроля.

Передвижение каждого человека в метрополитене является детерминированным, т.е. ежедневные перемещения пассажиров являются целенаправленными и определенными [16]. Изучение передвижения пассажиров требует вероятностной интерпретации. В работе [17] предлагается вероятностный метод, ориентированный на прогнозирование пассажиропотоков в системе метрополитена. Данный метод заключается в получении вероятности появления определенного человека на определенной станции метрополитена. Данные о месте отправления пассажиров рассчитываются исходя из данных о месте назначения, а затем, собрав все данные, имеется возможность предсказать пассажиропотоки в системе метрополитена. Результаты показывают, что, хотя вероятностный метод имеет более низкую производительность, чем существующие подходы для прогнозирования пассажиропотоков, он способен прогнозировать несколько дополнительных видов пассажиропотоков на станциях и во всей системе метрополитена.

Математическое моделирование является перспективным методом для решения задач, связанных с пассажиропотоками, способным учитывать движение транспорта, алгоритмы движения людей и любые динамические изменения [18–20], в частности транспортных систем. Математическое моделирование способно решать следующие задачи:

- принятие оптимальных объемно-планировочных решений станций для безопасного и комфортного передвижения пассажиров в режиме пассажирской эксплуатации;
- определение количества пассажиров в определенный момент времени для проверки условий безопасной эвакуации и комфортного пребывания;
- оптимизация стоимости и управления: выбор оптимальных объемно-планировочных решений, заблаговременное определение всевозможных сценариев и режимов работы метрополитена.

Математическое моделирование пассажиропотоков позволяет имитировать поведение пассажиров на станционном комплексе или в целом системы метрополитена [21–23]. Главным преимуществом данного метода является возможность переключаться в пространстве и времени, ускорять или замедлять протекание процесса в зависимости от типов препятствий и объектов модели, отражающих приближенные к реальности процессы перемещения людей с учетом технологических решений. При использовании метода математического моделирования в качестве исходных данных необходимо задавать пассажиропоток на вход, выход и пересадку, алгоритмы движения пассажиров по станционному комплексу, для получения которых имеется два способа: визуальный метод и метод видеонаблюдения.

Визуальный метод имеет ряд недостатков: зависимость точности измерения параметров движения людских потоков от субъективного мнения наблюдателя; необходимость привлечения большого количества наблюдателей для получения сравнительно точных эмпирических данных; сложность определения параметров движения людских потоков при скоротечном движении на исследуемых участках или повышенной плотности людей на них; невозможность зафиксировать параметры в определенный интервал времени и провести анализ кинематики движения потока. Приведенные недостатки решаются методом видеонаблюдения, впервые использовавшимся для определения движения людских потоков на станциях метрополитена. Первые видеонаблюдения в условиях сложной организации

движения пассажиров в пересадочных узлах метрополитена осуществлены в исследовании И.И. Исаевич [24]. Наблюдения проводились в кассовых залах вестибюля, на участках пути движения перед и после эскалатора, на платформах станций и перед автоматическими контрольными пунктами. Для прогнозирования пассажиропотока и оптимальности принятых объемно-планировочных решений станций метрополитена необходимо экспериментальным путем исследовать зависимости движения пассажиров на всех топологиях станции.

Программный комплекс Pathfinder является инструментом для моделирования пассажиропотока и эвакуации в зданиях и сооружениях по индивидуально-поточной модели движения, позволяет задавать алгоритмы поведения людей. В работе [25] использовано программное обеспечение Pathfinder для моделирования эвакуации на станции метрополитена. Результаты показали, что основное влияние на станции метрополитена на движение пассажиров оказывают лестничные сходы, эскалаторы и соответствующая им ширина. Работа [26] направлена на моделирование эвакуации пассажиров в ПК Pathfinder при различных условиях и параметрах: регистрировались скорость движения пассажиров, количество людей, проходящих через различные топологии. В исследовании [27] с использованием индивидуально-поточной модели движения пассажиров в ПК Pathfinder приведено, что на эвакуацию со станции метрополитена оказывают влияние тип платформы, габариты лестниц, эскалаторов и геометрические параметры самой станции. Результаты математического моделирования являются необходимыми для обоснования принятых объемно-планировочных решений станций метрополитена на стадии проектирования и для предложений управления и организации движения пассажиров при эксплуатационном режиме и при возникновении любой чрезвычайной ситуации, в том числе при пожаре.

Целью статьи является обоснование метода математического моделирования пассажиропотоков для разработки оптимальных объемно-планировочных решений пересадочных станций метрополитена для обеспечения комфортного пребывания пассажиров при эксплуатационном режиме работы станции и в часы пиковой загруженности и безопасной эвакуации пассажиров и персонала при возникновении пожара.

Материалы и методы

В качестве примера обоснования объемно-планировочных решений станции метрополитена в ПК Pathfinder разработана модель пересадочной станции, состоящая из станции «Существующая» островного типа, построенная до 2000 г., и современной станции «Новая» бокового типа (рис. 2).

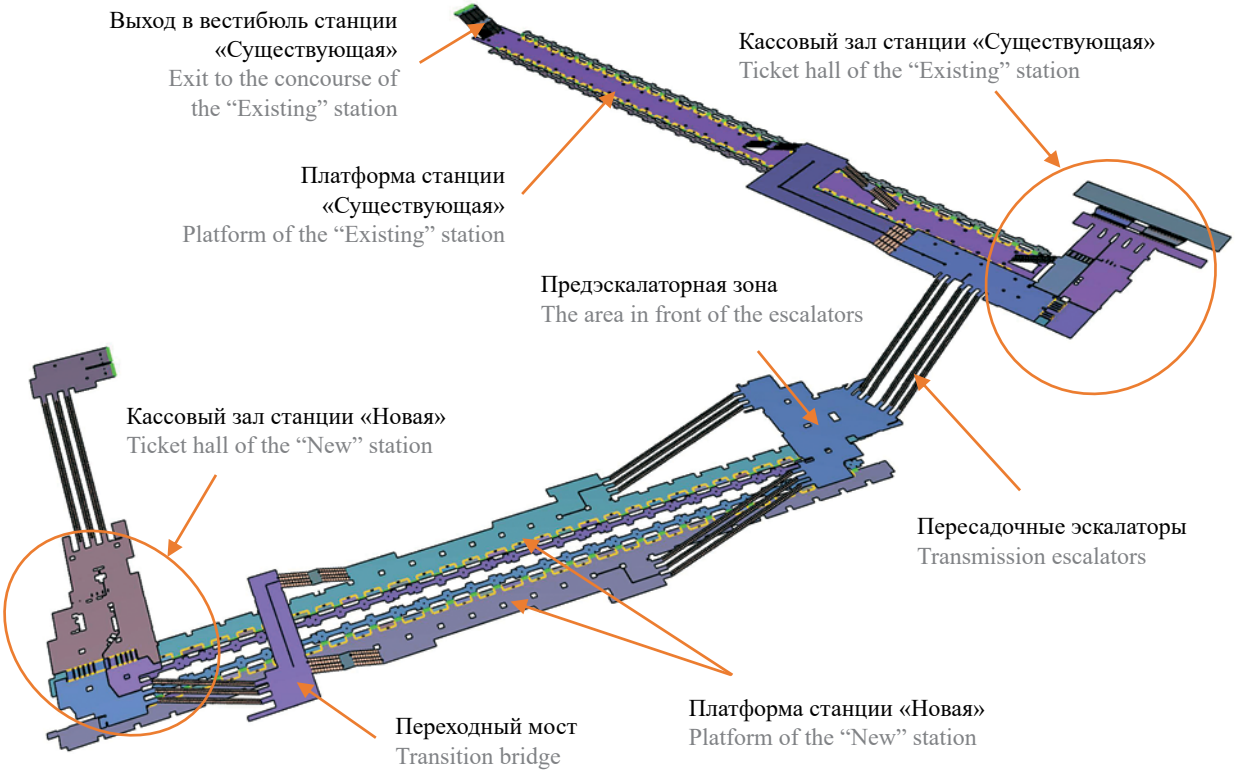


Рис. 2. Модель типовой пересадочной станции в ПК Pathfinder
Fig. 2. Model of a typical interchange station in the software package Pathfinder

Существующие пассажирские платформы проектировались островного типа преимущественно с двумя рассредоточенными эвакуационными выходами (через вестибюли). Выход на пересадку главным образом осуществляется через лестничный сход, располагающийся по центру платформы станции «Существующая». Современные пассажирские платформы проектируются бокового типа с двумя эвакуационными выходами (через вестибюль и пересадочную станцию). Выход на пересадку в основном осуществляется через эскалаторы, располагающиеся по центру каждой из платформ и ведущие в предэскалаторную пересадочную зону. Выход в вестибюль с боковых платформ осуществляется через переходной мост, ведущий по эскалатору в вестибюль. Для пересадочной станции приняты усредненные значения пассажиропотоков на входы, выходы и пересадки (рис. 3). При разработке математической модели в ПК Pathfinder и последующем моделировании использовались параметры движения людей, представленные в Методике[4]. Следовательно, результаты, полученные при моделировании, являются оценочными, так как в настоящее время отсутствуют данные по составу людского потока и по параметрам движения людских потоков на станциях метрополитена по различным участкам пути (платформа, эскалатор, лестничные сходы, турникеты, двери типа «Метро»).

[4] Приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».

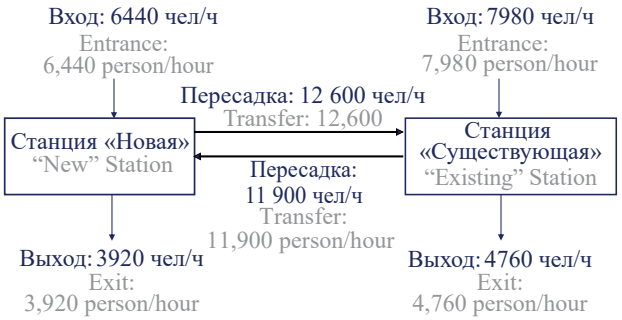


Рис. 3. Значения пассажиропотоков на входы, выходы и пересадки
Fig. 3. Values of passenger flows to entrances, exits and transfers

Пути движения пассажиров по типовой пересадочной станции согласно исходным объемно-планировочным решениям представлены на рис. 4. Согласно п. 7.1.3 СП 59.13330.2020[5], расчетное количество маломобильных групп населения (МГН) М2 и М3 принято 5 % от общего числа, а людей группы М4 — 2 чел, согласно п. 5.16.6.16[1].

При спуске с пересадочных эскалаторов пассажиры распределяются по первому и второму пути станции «Новая», образуя пересечение потоков с пассажирами, двигающимися на пересадку в сторону станции «Существующая» и объединяющимися с потоком пассажиров, вошедших в кассовый зал вестибюля станции «Существующая». Образовавшееся пересечение потока противоречит требованиям[1].

Скорость выхода пассажиров из двери вагона определялась по формуле:

[5] СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.

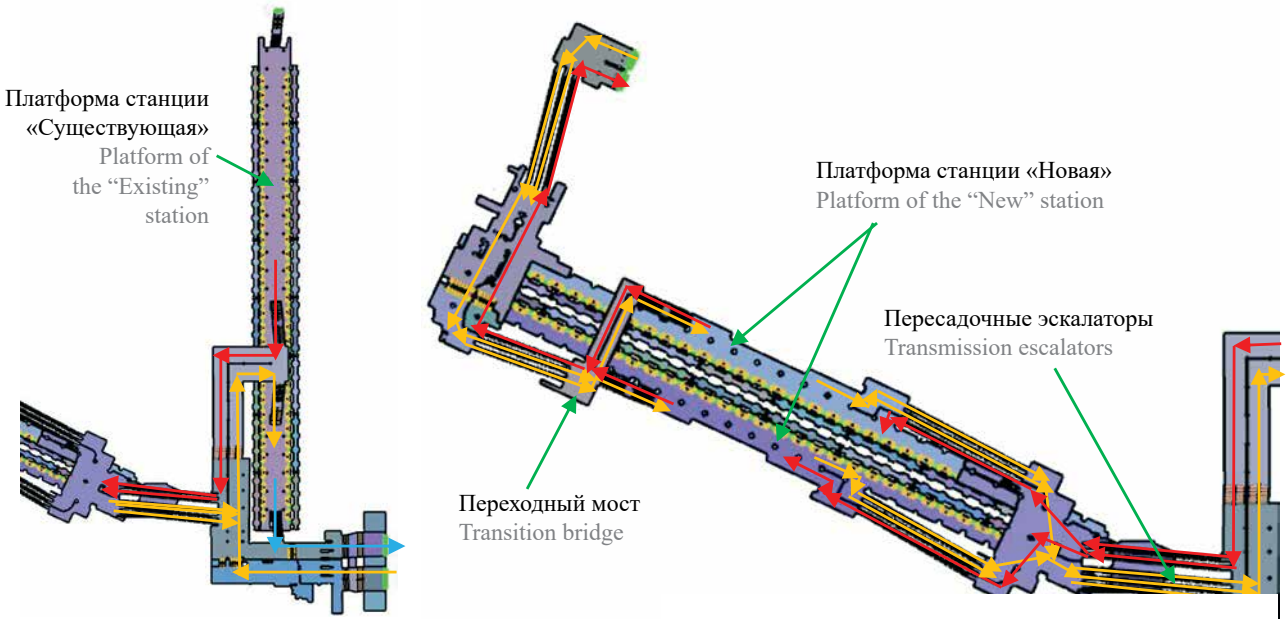


Рис. 4. Пути движения пассажиров по исходным объемно-планировочным решениям
Fig. 4. Ways of passenger traffic on the initial space-planning solutions

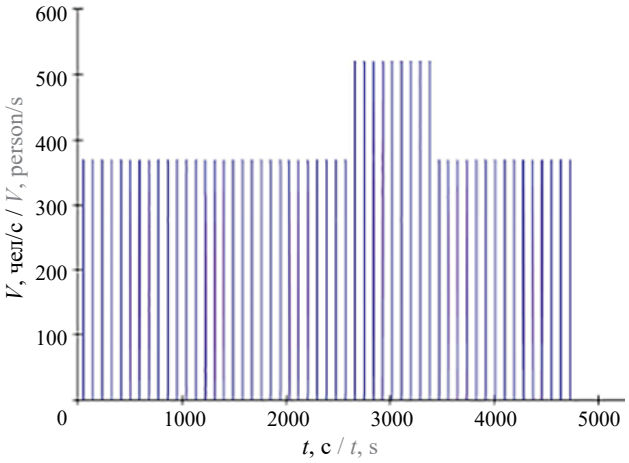


Рис. 5. Зависимость скорости выхода пассажиров из двери поезда
Fig. 5. Dependence of exit speed of passengers from the door of the train

$$q_i = \frac{N_п}{t_в \cdot n_п \cdot n_в \cdot n_д \cdot 2}, \quad (2)$$

где $N_п$ — количество пассажиров, выходящих из поезда, чел;

$t_в$ — время высадки пассажиров из вагона, с;

$n_п$ — количество пар поездов в час;

$n_в$ — количество вагонов в составе;

$n_д$ — количество дверей в вагоне.

Скорость входа пассажиров на станцию определялась по формуле:

$$q_i = \frac{Q_{вх}}{3600}, \quad (3)$$

где $Q_{вх}$ — пассажиропоток входа на станцию, чел.

Графическое отображение задания зависимости скорости выхода пассажиров из двери поезда в ПК Pathfinder представлено на рис. 5. Принцип моделирования входа и выходов пассажиров из поезда представлен на рис. 6. Интервал времени на выход пассажиров из вагона — 10 с, интервал времени на вход пассажиров в вагон — 10 с. С учетом 40 пар поездов в час время между прибытиями поездов — 90 с. Время моделирования — 80 мин, время наступления часа пика — 2550 с, продолжительность пика — 900 с.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования пассажиропотока с исходными объемно-планировочными решениями

На рис. 7 представлены результаты моделирования пассажиропотока в утренний час пик на 500 и 1000-й с от начала расчета по исходным объемно-планировочным решениям. На 1000-й с образуется скопление пассажиров с плотностью порядка 5 чел/м^2 на лестничном сходе, расположенном на переходе между двумя станциями и ведущем в сторону станции «Существующая».

Результаты моделирования количества пассажиров в кассовых залах вестибюлей и на платформах, согласно исходным объемно-планировочным решениям, показали, что количество людей, находящихся на станциях, остается постоянным до начала 15-минутного пика (рис. 8). В интервале времени 15-минутного пика лестница, ведущая на станцию «Существующая», не обеспечивает требуемую пропускную способность и происходят скопления на всех топологиях, включая, в первую очередь, вестибюль станции «Существующая».

К «узкому» месту прототипа пересадочной станции относится лестница при переходе со станции «Новая» и при проходе пассажиров, вошедших в кассовый зал станции «Существующая», которая не обеспечивает требуемую пропускную способность. Также установлено, что необходимо регулировать пассажиропотоки ограждениями для их

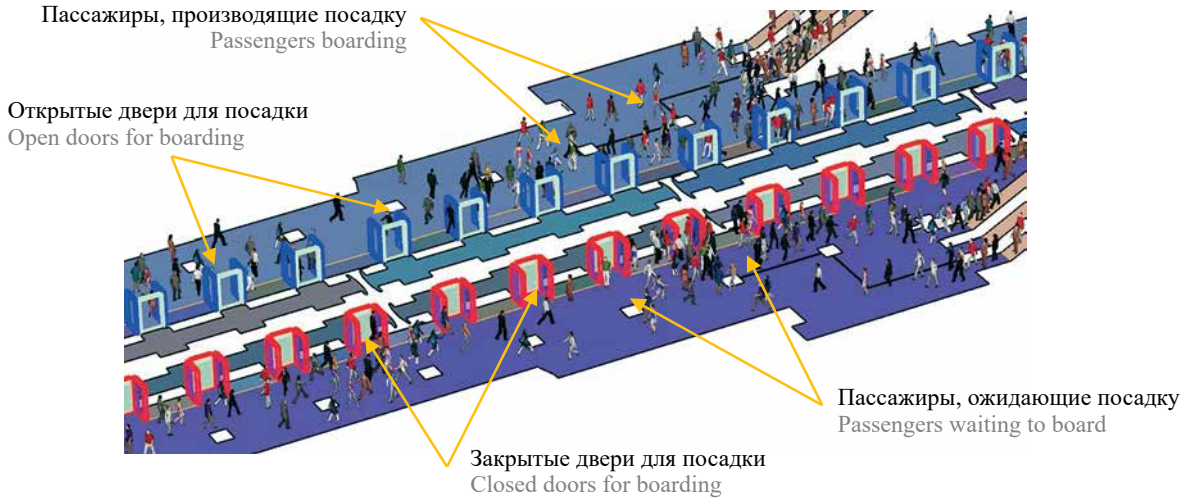


Рис. 6. Принцип моделирования входа и выходов пассажиров из поезда
Fig. 6. Principle of modelling of entry and exit of passengers from the train

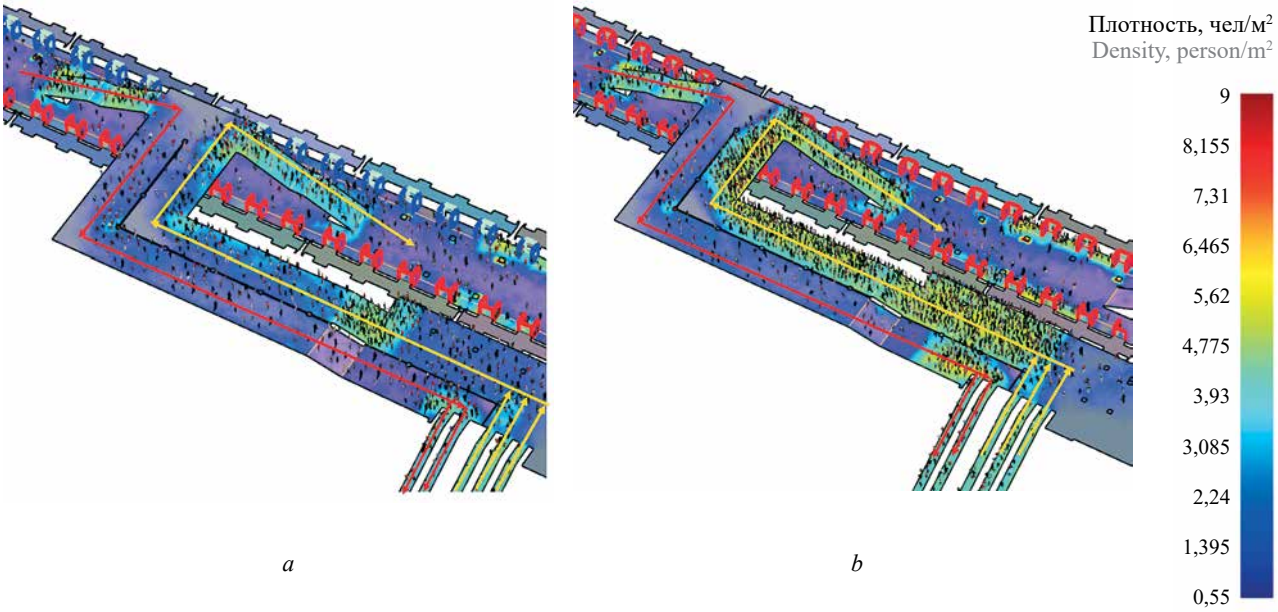


Рис. 7. Результаты моделирования пассажиропотока на 500-й (*a*) и 1000-й (*b*) с по исходным объемно-планировочным решениям на пересадке «Существующей» станции

Fig. 7. The results of modelling of passenger flow at 500 (*a*) and 1,000 (*b*) seconds by the initial space-planning solutions at the interchange "Existing" station

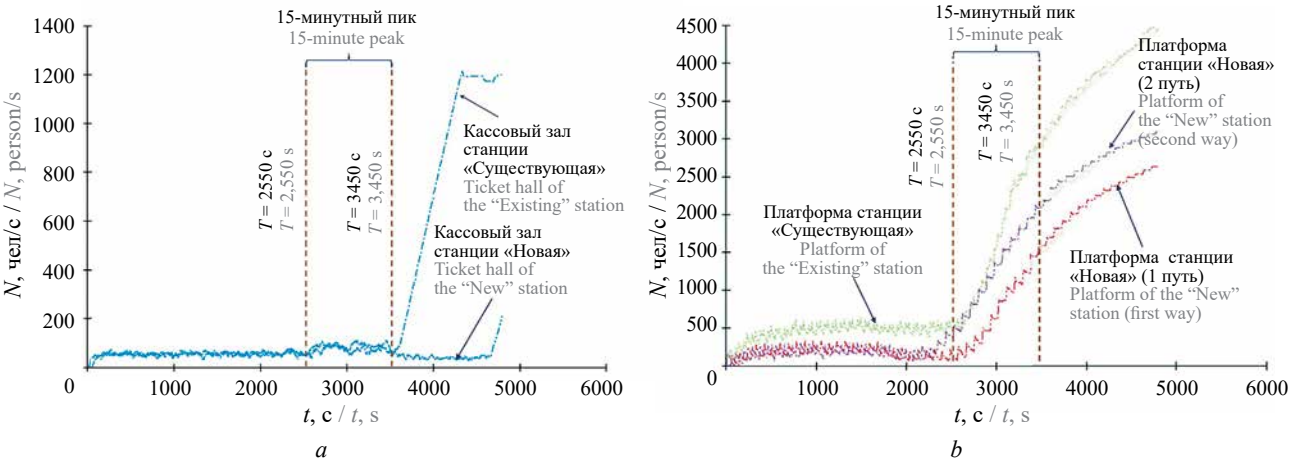


Рис. 8. Количество пассажиров согласно исходным объемно-планировочным решениям: *a* — в кассовых залах; *b* — на платформах

Fig. 8. The number of passengers according to the initial space-planning solutions: *a* — in the ticket halls; *b* — on the platforms

разделения и оптимально принимать направления движения по лестницам и эскалаторам.

Результаты моделирования пассажиропотока с оптимизированными объемно-планировочными решениями

Методом математического моделирования проведены оптимизационные мероприятия пассажиропотоков типовой пересадочной станции: увеличены габариты лестницы, ведущей на станцию «Существующая», установлены ограждения для разделения пассажиропотоков и приняты оптимальные направления движения пассажиров по лестницам и эскалаторам (рис. 9). Пассажиры, вышедшие с поездов на двух путях станции «Новая» и поднимающиеся на станцию «Существующая» по трем пересадочным эскалаторам, объединяются с потоком пассажиров, вошедших в кассовый зал вестибюля станции «Существующая». В результате на предэскалаторной зоне не возникает пересечения потоков. Таким образом, оптимизированные объемно-планировочные решения выполняют условие непересечения потока, регламентированное в СП[1].

На рис. 10 представлены результаты моделирования пассажиропотока в утренний час пик на 500 и 1000-й с от начала расчета по оптимизированным объемно-планировочным решениям. Скопление пассажиров с плотностью порядка 5 чел/м² отмечается только на лестнице, ведущей на станцию «Существующая», при этом обеспечивается свободное и безопасное перемещение пассажиров.

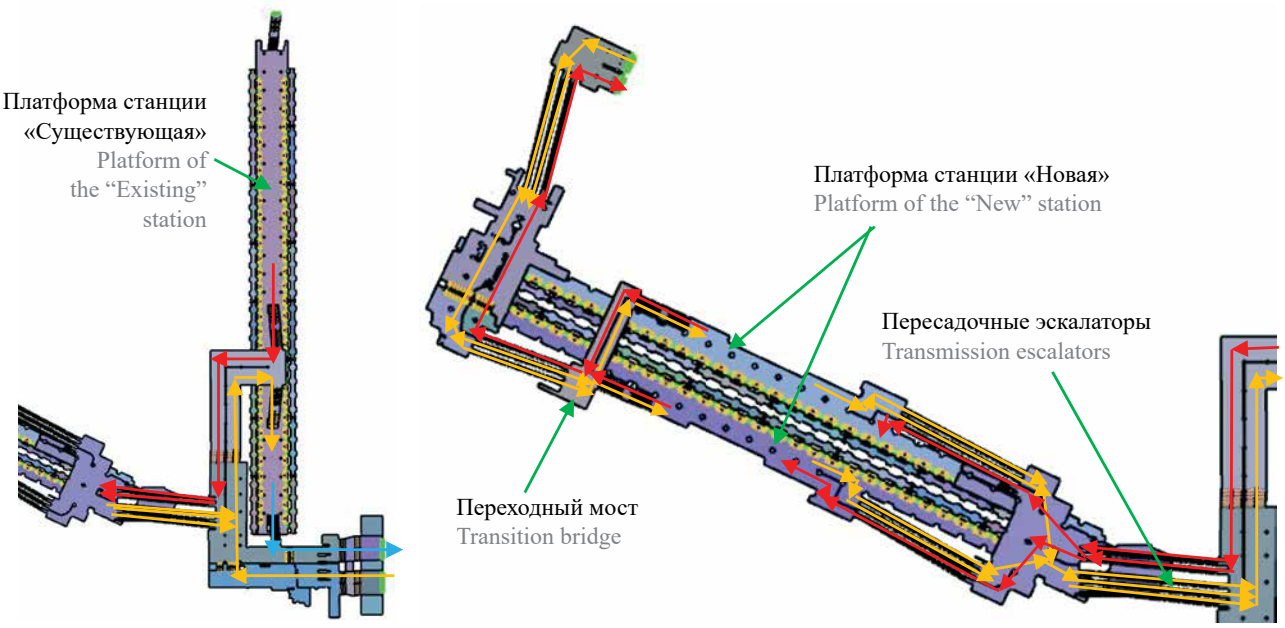


Рис. 9. Пути движения пассажиров по оптимизированным объемно-планировочным решениям
Fig. 9. Passenger traffic routes along the optimized space-planning solutions

Результаты моделирования количества пассажиров в кассовых залах вестибюлей и на платформах, согласно оптимизированным объемно-планировочным решениям, показали, что количество людей на данных топологиях остается постоянным до начала 15-минутного пика (рис. 11). В интервале времени 15-минутного пика происходит увеличение числа пассажиров и в кассовых залах вестибюлей, и на платформах. По его окончании количество людей стабилизируется без образования скоплений.

Моделирование эвакуации пассажиров со станции метрополитена с оптимизированными объемно-планировочными решениями

Рассмотрен сценарий эвакуации пассажиров при возникновении пожара в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда на платформу станции «Существующая» (рис. 12). Для моделирования распространения опасных факторов пожара

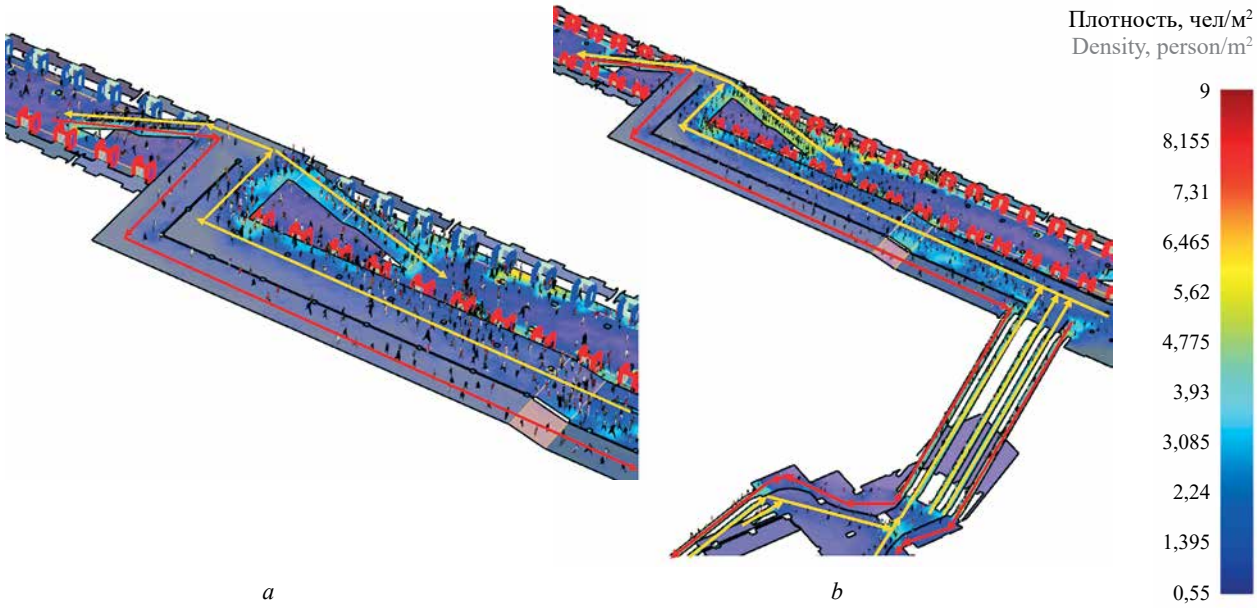


Рис. 10. Результаты моделирования пассажиропотоков на 500 (*a*) и 1000-й (*b*) с по оптимизированным объемно-планировочным решениям
Fig. 10. The results of modelling of passenger flow at 500 (*a*) and 1,000 (*b*) seconds by optimized space-planning solutions

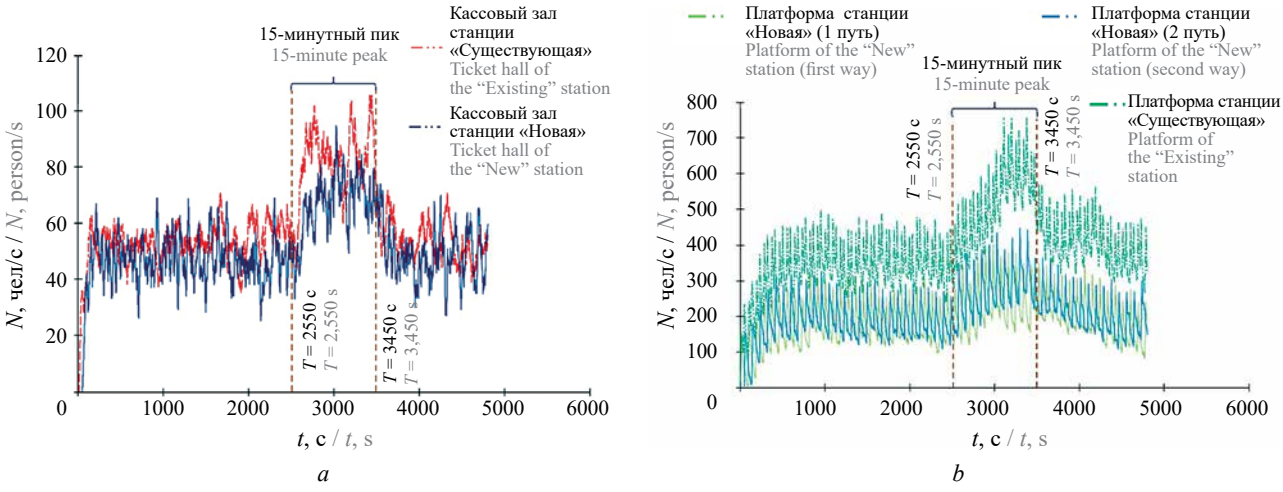


Рис. 11. Количество пассажиров согласно оптимизированным объемно-планировочным решениям: *a* — в кассовых залах; *b* — на платформах

Fig. 11. The number of passengers according to the optimized space-planning solutions: *a* — in the ticket halls; *b* — on the platforms

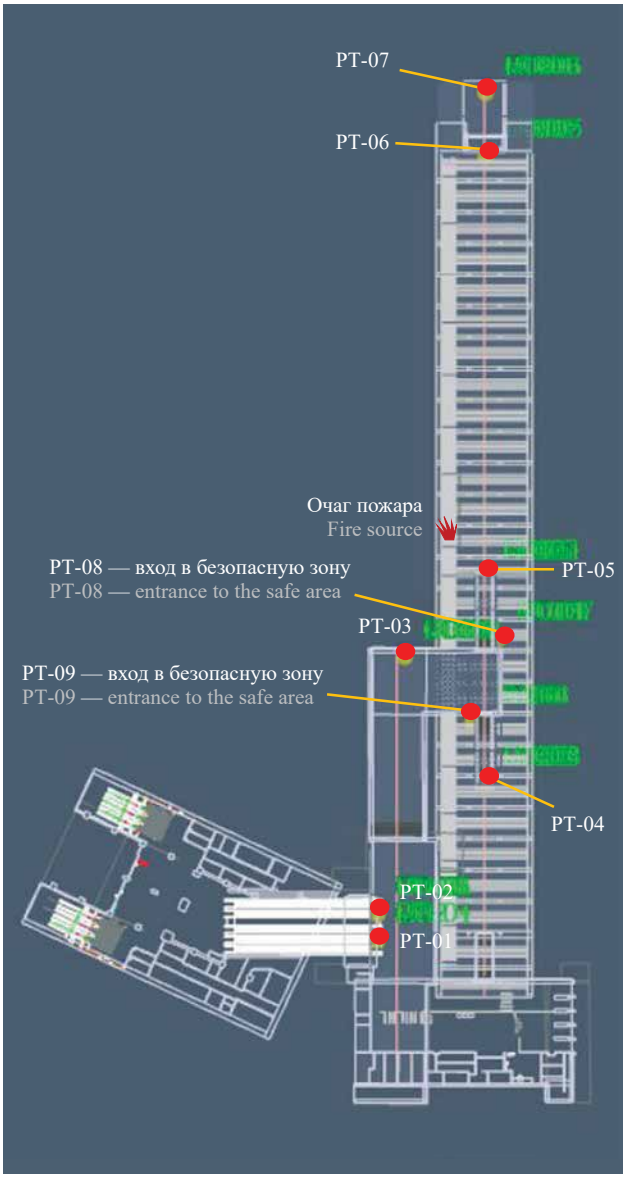


Рис. 12. Расположение расчетных точек на расчетной модели

Fig. 12. Location of calculation points on the design model

использовался ПК PyroSim, представляющий собой графический пользовательский интерфейс для FDS.

Принято, что время возникновения пожара в вагоне поезда — 2910 с от начала моделирования пассажиропотока. Со скоростью движения поезда в аварийном режиме 45 км/ч и с принятым расстоянием 2,9 км между станциями время прибытия поезда на станцию «Существующая» с момента его возгорания — 4,5 мин. В течение этого времени пассажиры скапливаются на платформе станции. Время прибы-

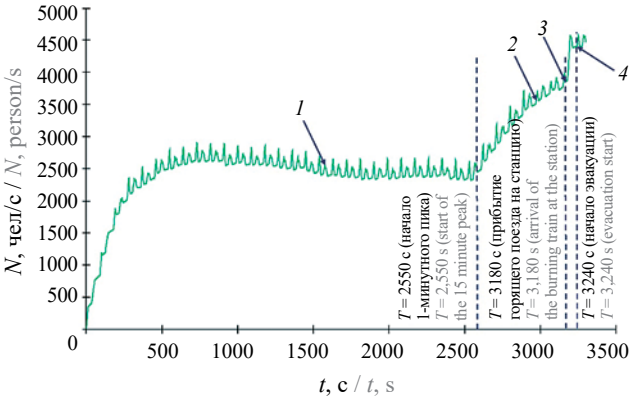


Рис. 13. Зависимость количества пассажиров от времени на пересадочной станции до начала эвакуации: *1* — моделирование пассажиропотока на типовой пересадочной станции до начала 15-минутного пика; *2* — эксплуатационный режим работы станции в течение 15-минутного пика; *3* — 3180-я с: прибытие горящего поезда на станцию платформу станции «Существующая», выход пассажиров на станцию из поезда; *4* — 3240-я с: начало эвакуации пассажиров

Fig. 13. Dependence of the number of passengers from the time at the interchange station before the beginning of the evacuation: *1* — simulation of passenger flow at a typical transfer station before the start of the 15-minute peak; *2* — operating regime of the station during the 15-minute peak; *3* — 3,180 second: arrival of the burning train at the station "Existing" platform, exit of passengers to the station from the train; *4* — 3,240 second: start of passenger evacuation

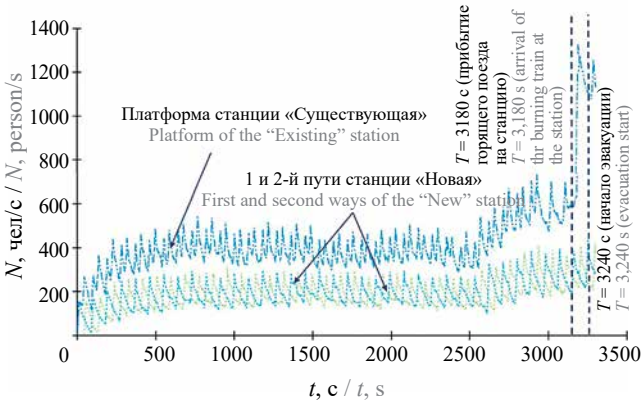


Рис. 14. Зависимость количества пассажиров от времени на платформах станции «Существующая» и «Новая»
Fig. 14. Dependence of the number of passengers from the time on the platforms of the stations "Existing" and "New"

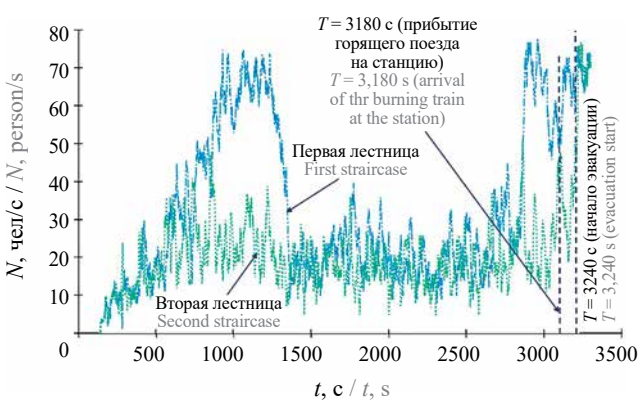


Рис. 15. Зависимость количества пассажиров от времени на лестницах, ведущих на платформу станции «Существующая»
Fig. 15. Dependence of the number of passengers from the time on the stairs leading to the platform of the station "Existing"

тия горящего поезда на станцию — 3180-я с от начала моделирования пассажиропотока. Время начала эвакуации — 3240-я с согласно Методике[4], время начало эвакуации пассажиров на платформе — 60 с, персонала — 90 с). Общее количество людей, находящихся на пересадочной станции на 3240-й с, — 4409 чел.

Количество людей, находящихся в горящем поезде, принято на основании максимальной вместимости поезда в соответствии с п. 5.2.3.[1] — 1517 чел, из которых 0,1 % МГН группы М4 — по 1 чел в первом и последнем вагонах.

1. 19.06.2023 17:26:39

Зависимость количества людей, находящихся на различных топологиях станции, от времени представлены на рис. 13–15.

По результатам моделирования на основных топологиях типовой пересадочной станции

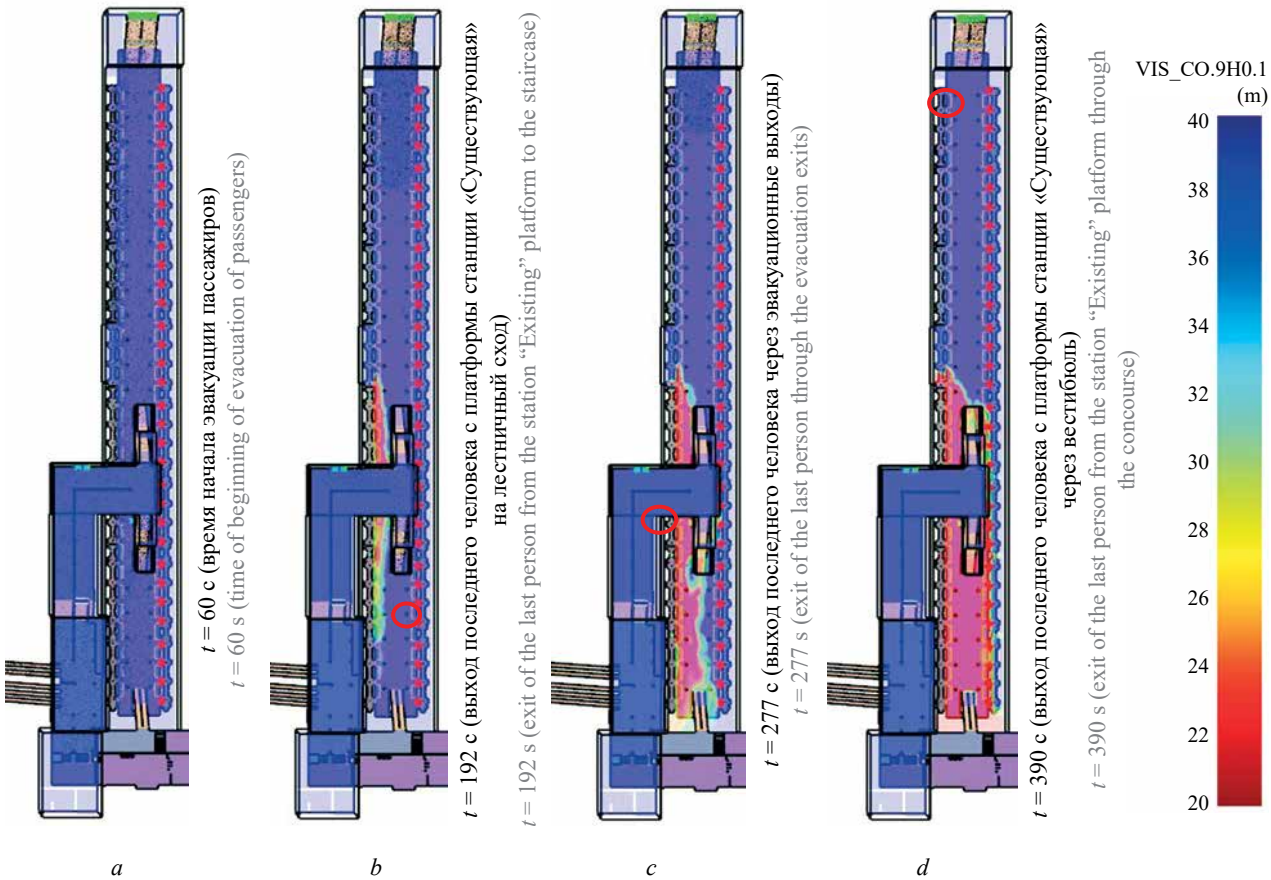


Рис. 16. Зависимость дистанции видимости на уровне рабочей зоны (1,7 м от платформы станции «Существующая» и переходе на платформу станции «Новая») от времени
Fig. 16. Dependence of visibility distance at the working area level (1.7 m from the station platform "Existing" and the passage to the station platform "New") from the time

Анализ условий безопасной эвакуации при пожаре
Analysis of safe evacuation conditions in case of fire

Расчетная точка Calculation point	Время эвакуации $t_{эв}$, мин Evacuation time t_{ev}, min	$0{,}8\tau_{бл}$, мин $0.8\tau_{bl}$, min	Выполнение условия $\tau_{эв} \le 0{,}8\tau_{бл}$ Fulfillment of the condition $\tau_{ev} \le 0.8\tau_{bl}$	
РТ-01	1,97	–	Выполнено Done	Выполнено Done
РТ-02	1,90	–	Выполнено Done	
РТ-03	4,62	–	Выполнено Done	
РТ-04	3,20	3,47	Выполнено Done	
РТ-05	4,03	4,13	Выполнено Done	
РТ-06	6,50	–	Выполнено Done	
РТ-07	7,75	–	Выполнено Done	
РТ-08	3,92	5,20	Выполнено Done	
РТ-09	–	2,80	Выполнено Done	

Примечание: $\tau_{бл}$ — время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.
Note: τ_{bl} — time of blocking evacuation routes by fire hazards.

в момент начала эвакуации (выход пассажиров из горящего поезда) принято 3684 пассажира и 296 работников метрополитена. На рис. 16 представлены зависимости дистанции видимости на уровне рабочей зоны на уровне платформы «Существующая» и на переходе на платформу станции «Новая».

Анализ условий безопасной эвакуации при пожаре в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда на платформу станции «Существующая» представлен в таблице.

Результаты моделирования распространения опасных факторов пожара и эвакуации пассажиров показывают, что:

- опасная зона формируется в районе расположения вагона с очагом пожара и на участке платформы у лестничного схода, ведущего в сторону пересадки и эвакуационных выходов. За 390 с пассажиры и персонал, находящиеся на платформе станции «Существующая», покидают опасную зону;
- значения опасных факторов пожара в расчетных точках не достигают критических значений до момента завершения моделирования эвакуации через эти точки;
- общее расчетное время эвакуации пассажиров и персонала из типовой пересадочной станции — 814 с (13,57 мин).

Выводы

В результате работы получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор и анализ научных работ в области прогнозирования пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах, в том числе метрополитенах. На основе полученных результатов выявлено, что математическое моделирование является перспективным методом, позволяющим принимать оптимальные объемно-планировочные решения станций, проводить расчеты по обеспечению условий безопасной эвакуации в определенный момент времени и определять всевозможные сценарии возникновения чрезвычайных ситуаций, в том числе пожаров, и режимов работы метрополитена.

2. Разработана и реализована математическая модель типовой пересадочной станции для определения оптимальных объемно-планировочных решений и расчета безопасной эвакуации пассажиров при возникновении пожара. Отличительной особенностью математической модели является задание алгоритмов поведения пассажиров исходя из значений пассажиропотоков и возможность получения точного числа людей, находящихся на всех топологиях станции в момент начала эвакуации.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в предложении метода для анализа принимаемых объемно-планировочных решений

не только транспортно-пересадочных узлов, но и для любых общественных транспортных сооружений. Метод математического моделирования позволяет обосновать достаточность объемно-планировочных решений, оптимизировать пути движения пассажиров в зависимости от топологии и пассажиропотоков, определить количество людей на каждом элементе объекта, которые будут использоваться как исходные данные для расчетов эвакуации людей при чрезвычайной ситуации, в том числе при пожаре.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности использования математического моделирования в деятельности научных и проектных организаций для обоснования требований федеральных законов и иных нормативных документов по проектированию общественных и транспортно-пересадочных сооружений и обеспечения комфортного и безопасного нахождения людей на объектах.

На основе данного исследования в новой редакции[1] СП 120.13330.2022 «Метрополитены» внесены изменения, определяющие, что расчетная численность пассажиров, эвакуирующихся со станции при пожаре, определяется на основе математического моделирования пассажиропотоков в час пик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Liang X., Qin H., Xie M.* Simulation study of passenger flow characteristics in subway passage // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. 2016. DOI: 10.12783/dtcse/cmsam2016/3565
2. *Yang X., Yang X., Pan F., Kang Y., Zhang J.* The effect of passenger attributes on alighting and boarding efficiency based on social force model // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 565. P. 125566. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125566
3. *Lei W., Li A., Gao R., Hao X., Deng B.* Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2012. Vol. 391. Issue 22. P. 5355–5365. DOI: 10.1016/j.physa.2012.06.033
4. *Авдеев В.С.* Распределение пассажиропотока на примере транспортной системы Московского метрополитена // Этносоциум и межнациональная культура. 2020. № 147 (9). С. 36–40. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44534003
5. *Zou Q., Yao X., Zhao P., Dou F., Yang T.* Managing recurrent congestion of subway network in peak hours with station inflow control // Journal of Advanced Transportation. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2018/6931025
6. *Peimbert M., Alcaraz L.D.* Where environmental microbiome meets its host: Subway and passenger microbiome relationships // Molecular Ecology. 2022. Vol. 32. Issue 10. Pp. 2602–2618. DOI: 10.1111/mec.16440
7. *Wang L., Chen Y., Wang C.* Research on evolutionary model of urban rail transit vulnerability based on computer simulation // Neural Computing and Applications. 2020. Vol. 32. Issue 1. Pp. 195–204. DOI: 10.1007/s00521-018-3793-6
8. *Jia F., Jiang X., Li H., Yu X., Xu X., Jiang M.* Passenger-oriented subway network capacity calculation and analysis based on simulation // Transportation Letters. 2021. Vol. 13. Issue 8. Pp. 555–567. DOI: 10.1080/19427867.2020.1741778
9. *Xue H., Jia L., Guo J.* Adaptive multilevel collaborative passenger flow control in peak hours for a subway line // Advances in Mathematical Physics. 2020. Vol. 2020. Issue 3. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2020/3862157
10. *Кударов Р.С.* Математические модели формирования входного пассажиропотока станций метрополитена : автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 2009. 16 с.
11. *Константинова Т.Ю.* Методы и средства оптимизации режимов работы устройств станций и узлов метрополитена : автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 2006. 24 с.
12. *Zhang B., Xu Z.S., Zhao Q.W., Liu Y.Y.* A study on theoretical calculation method of subway safety evacuation // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 597–604. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.085
13. *Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment G.* Modelling of heat energy recovery potential form underground railways with nearby vertical ground heat exchangers in an urban environment // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 147. Pp. 1059–1069. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118
14. *Wu J., Shen F.* Experimental study on the effects of ventilation on smoke movement in tunnel fires // International Journal of Ventilation. 2016. Vol. 15. Issue 1. Pp. 94–103. DOI: 10.1080/14733315.2016.1173295
15. *He Z., Chen Y., Sun L., Zhong J., Zhu Y.* Identifying station-link correlation for target passenger flow control in subway network // 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2018. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569533
16. *Ембулаев В.Н.* Вероятностный метод определения поездок пассажиров на маршруте по данным входа и выхода // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. № 11 (2). С. 58–69. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/058-069
17. *Leng B., Zeng J., Xiong Z., Lv W., Wan Y.* Probability tree based passenger flow prediction and its application to the Beijing subway system // Frontiers of Computer Science. 2013. Vol. 7. Issue 2. Pp. 195–203. DOI: 10.1007/s11704-013-2057-y

18. *Xu X., Li H., Liu J., Ran B., Qin L.* Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study // Transportmetrica B. 2019. Vol. 7. Issue 1. Pp. 446–472. DOI: 10.1080/21680566.2018.1434020
19. *Ling X., Huang Z., Wang C., Zhang F., Wang P.* Predicting subway passenger flows under different traffic conditions // PLoS ONE. 2018. Vol. 13. Issue 8. Pp. 1–23. DOI: 10.1371/journal.pone.0202707
20. *Sun Y., Zhang G., Yin H.* Passenger flow prediction of subway transfer stations based on nonparametric regression model // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2014. Vol. 2014. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2014/397154
21. *Лапшин В.А.* Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры // Молодой ученый. 2020. № 291. С. 33–36. URL: https://moluch.ru/archive/291/65976/
22. *Jiaojiao X., Jin L.* Simulation study on emergency evacuation of metro stations in fire degradation mode // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1187. Issue 5. P. 052072. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052072
23. *Xie C., Li X., Chen B., Lin F., Lin Y., Huang H.* Subway sudden passenger flow prediction method based on two factors: case study of the Dongsishitiao station in Beijing // Journal of Advanced Transportation. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5577179
24. *Исаевич И.И.* Разработка основ многовариантного анализа объемно-планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования закономерного движения людских потоков : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 1990. 18 с.
25. *Qin J., Liu C., Huang Q.* Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on pathfinder // Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 21. P. 100677. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100677
26. *Wang F.* Multi-scenario simulation of subway emergency evacuation based on multi-agent // International Journal of Simulation Modelling. 2021. Vol. 20. Issue 2. Pp. 387–397. DOI: 10.2507/IJSIMM20-2-CO8
27. *Huang Y., Lei J., Wang K.* The influence of obstructions of evacuation node on subway stations fire evacuation capability // Proceedings of the 8th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2018). 2018. DOI: 10.2991/rac-18.2018.42

REFERENCES

1. Liang X., Qin H., Xie M. Simulation study of passenger flow characteristics in subway passage. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. 2016. DOI: 10.12783/dtcse/cmsam2016/3565
2. Yang X., Yang X., Pan F., Kang Y., Zhang J. The effect of passenger attributes on alighting and boarding efficiency based on social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021; 565:125566. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125566
3. Lei W., Li A., Gao R., Hao X., Deng B. Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012; 391(22):5355-5365 DOI: 10.1016/j.physa.2012.06.033
4. Avdeev V.S. Distribution of passenger traffic on the example of the transport system of the moscow metro. *Ethnosociety and Interethnic Culture*. 2020; 147(9):36-40. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44534003 (rus).
5. Zou Q., Yao X., Zhao P., Dou F., Yang T. Managing recurrent congestion of subway network in peak hours with station inflow control. *Journal of Advanced Transportation*. 2018; 2018:1-16. DOI: 10.1155/2018/6931025
6. Peimbert M., Alcaraz L.D. Where environmental microbiome meets its host: Subway and passenger microbiome relationships. *Molecular Ecology*. 2022; 32(10):2602-2618. DOI: 10.1111/mec.16440
7. Wang L., Chen Y., Wang C. Research on evolutionary model of urban rail transit vulnerability based on computer simulation. *Neural Computing and Applications*. 2020; 32(1):195-204. DOI: 10.1007/s00521-018-3793-6
8. Jia F., Jiang X., Li H., Yu X., Xu X., Jiang M. Passenger-oriented subway network capacity calculation and analysis based on simulation. *Transportation Letters*. 2021; 13(8):555-567. DOI: 10.1080/19427867.2020.1741778
9. Xue H., Jia L., Guo J. Adaptive multilevel collaborative passenger flow control in peak hours for a subway line. *Advances in Mathematical Physics*. 2020; 2020(3):1-16. DOI: 10.1155/2020/3862157
10. Kudarov R.S. *Mathematical models of formation of entrance passenger flow in metro stations :abstract of the dissertation of the Candidate of technical sciences*. Saint Petersburg, 2009; 16. (rus).
11. Konstantinova T.Yu. *Methods and means to optimize operation modes of stations and subway nodes : abstract of Ph.D. in Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2006; 24. (rus).
12. Zhang B., Xu Z.S., Zhao Q.W., Liu Y.Y. A study on theoretical calculation method of subway safety evacuation. *Procedia Engineering*. 2014; 71:597-604. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.085
13. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment G. Modelling of heat energy recovery potential form underground railways with nearby vertical ground heat exchangers in an urban environment. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 147:1059-1069. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118
14. Wu J., Shen F. Experimental study on the effects of ventilation on smoke movement in tunnel fires. *International Journal of Ventilation*. 2016; 15(1):94-103. DOI: 10.1080/14733315.2016.1173295

15. He Z., Chen Y., Sun L., Zhong J., Zhu Y. Identifying station-link correlation for target passenger flow control in subway network. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2018. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569533
16. Embulaev V.N. A probabilistic method of determining a travel route according to the input and output. *Territory of new opportunities. Bulletin of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2019; 11(2):58-69. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/058-069 (rus).
17. Leng B., Zeng J., Xiong Z., Lv W., Wan Y. Probability tree based passenger flow prediction and its application to the Beijing subway system. *Frontiers of Computer Science*. 2013; 7(2):195-203. DOI: 10.1007/s11704-013-2057-y
18. Xu X., Li H., Liu J., Ran B., Qin L. Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study. *Transportmetrica B*. 2019; 7(1):446-472. DOI: 10.1080/21680566.2018.1434020
19. Ling X., Huang Z., Wang C., Zhang F., Wang P. Predicting subway passenger flows under different traffic conditions. *PLoS ONE.* 2018; 13(8):1-23. DOI: 10.1371/journal.pone.0202707
20. Sun Y., Zhang G., Yin H. Passenger flow prediction of subway transfer stations based on nonparametric regression model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2014; 2014(1):1-8. DOI: 10.1155/2014/397154
21. Lapshin V.A. Peculiarities of modeling the passenger flow of transport infrastructure facilities. *Young Scientist*. 2020; 291:33-36. URL: https://moluch.ru/archive/291/65976/ (rus).
22. Jiaojiao X., Jin L. Simulation study on emergency evacuation of metro stations in fire degradation mode. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1187(5):052072. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052072
23. Xie C., Li X., Chen B., Lin F., Lin Y., Huang H. Subway sudden passenger flow prediction method based on two factors: Case study of the Dongsishitiao station in Beijing. *Journal of Advanced Transportation*. 2021; 2021:1-8. DOI: 10.1155/2021/5577179
24. Isayevich I.I. *Development of foundations for the multivariant analysis of the space-planning solutions of metro stations and interchange hubs on the basis of simulation of the regular motion of human flows : abstract of Ph.D. in Technical Sciences*. Moscow, 1990; 18. (rus).
25. Qin J., Liu C., Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 21:100677. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100677
26. Wang F. Multi-scenario simulation of subway emergency evacuation based on multi-agent. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021; 20(2):387-397. DOI: 10.2507/IJSIMM20-2-CO8
27. Huang Y., Lei J., Wang K. The influence of obstructions of evacuation node on subway stations fire evacuation capability. *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2018).* 2018. DOI: 10.2991/rac-18.2018.42

Поступила 03.03.2023, после доработки 24.03.2023;
принята к публикации 06.04.2023
Received March 3, 2023; Received in revised form March 24, 2023;
Accepted April 6, 2023

Информация об авторах

ШАБУНИНА Дарья Евгеньевна, научный сотрудник, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», Россия, 188691, г. Кудрово, ул. Областная, 9; ORCID: 0000-0002-6155-060X; e-mail: shabunina@ciofp.ru

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», Россия, 188691, г. Кудрово, ул. Областная, 9; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; РИНЦ ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

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

Information about the authors

Daria E. SHABUNINA, Researcher, LLC "Fire Hazard Research Center", Oblastnaya St., 9, Kudrovo, 188691, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6155-060X; e-mail: shabunina@ciofp.ru

Andrey I. DANILOV, General Manager, LLC "Fire Hazard Research Center", Oblastnaya St., 9, Kudrovo, 188691, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 69–81
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):69-81

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.69-81

Расчетная оценка эффективности технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток при пожаре в жилых зданиях

Андрей Владимирович Пехотиков, Александр Анатольевич Абашкин, Александр Васильевич Гомозов ✉, Сергей Алексеевич Лучкин

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. Естественное проветривание обычных лестничных клеток при пожаре предусмотрено положениями нормативных документов в области пожарной безопасности и играет существенную роль для обеспечения безопасности людей. Анализируются вопросы эффективности проветривания лестничных клеток через оконные проемы в наружных стенах, а также через проемы выходов на кровлю.
Целью является разработка критериев и математических соотношений для оценки эффективности технических решений по проветриванию лестничных клеток, а также их апробация для жилых зданий различной этажности.
Методы. Используются математические методы, позволяющие прогнозировать концентрации продуктов горения на различных этажах лестничных клеток в зависимости от площади открытых оконных проемов и возможности открытия люков выходов на кровлю, а также аналитический метод оценки эффективности технических решений по проветриванию лестничных клеток.
Результаты. Разработаны теоретические положения, позволяющие оценить влияние площади открытых оконных проемов и люков выходов на кровлю на естественное проветривание обычных лестничных клеток в жилых зданиях секционного типа с выходами из квартир на лестничные клетки, а также проведены расчеты, позволяющие оценить эффективность этих решений в зданиях различной этажности.
Выводы. На основе исследований разработаны критерии и математические соотношения для оценки эффективности различных технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток. При этом эффективность этих решений определяется возможностью спасения людей из квартир соответствующего этажа без привлечения значительного числа пожарных и без применения средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения.

Ключевые слова: оконные проемы; выходы на кровлю; спасение людей при пожаре; предельные значения опасных факторов пожара; этажность жилых зданий

Для цитирования: *Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А.* Расчетная оценка эффективности технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток при пожаре в жилых зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 69–81. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.69-81

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

Calculation evaluation of the effectiveness of technical solutions for natural ventilation of ordinary staircases in case of fire in residential buildings

Andrey V. Pekhotikov, Alexander A. Abashkin, Alexander V. Gomozov ✉, Sergey A. Luchkin

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

ABSTRACT

Introduction. Natural ventilation of ordinary staircases in case of fire is provided for by the provisions of regulatory documents in the field of fire safety and plays an essential role in ensuring the safety of people. This article

© А.В. Пехотиков, А.А. Абашкин, А.В. Гомозов, С.А. Лучкин, 2023

analyzes the effectiveness of ventilation of staircases through window openings in the outer walls, as well as through the openings of exits to the roof.
The purpose of this article is to develop criteria and mathematical relationships for evaluating the effectiveness of technical solutions for ventilation of staircases, as well as their approbation for residential buildings of various heights.
Methods. Mathematical methods are used to predict the concentration of combustion products on different floors of stairwells, depending on the area of open window openings and the possibility of opening roof access hatches, as well as an analytical method for evaluating the effectiveness of technical solutions for ventilation of stairwells.
Results. Theoretical provisions have been developed to assess the effect of the area of open window openings and roof hatches on the natural ventilation of ordinary staircases in sectional-type residential buildings with exits from apartments to staircases, and calculations have been made to evaluate the effectiveness of these solutions in buildings of various heights.
Conclusions. Based on the research, criteria and mathematical ratios have been developed to evaluate the effectiveness of various technical solutions for the natural ventilation of ordinary staircases. At the same time, the effectiveness of these solutions is determined by the possibility of rescuing people from the apartments of the corresponding floor without the involvement of a significant number of firefighters and without the use of personal respiratory and eye protection equipment.

Keywords: window openings; exits to the roof; rescue of people in case of fire; limit values of fire hazards; residential buildings of various heights

For citation: Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Gomozov A.V., Luchkin S.A. Calculation evaluation of the effectiveness of technical solutions for natural ventilation of ordinary staircases in case of fire in residential buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):69-81. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.69-81 (rus).

✉ *Alexander Vasilievich Gomozov*, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Введение

Необходимость обеспечения возможности проветривания лестничных клеток типа Л1 регламентируется положениями СП[1], согласно требованиям которого в наружных стенах лестничных клеток типа Л1 должны быть предусмотрены на каждом надземном этаже окна, открывающиеся изнутри без ключа и других специальных устройств (открывание должно обеспечиваться стационарной фурнитурой, в том числе в виде удлинительной штанги без применения автоматических и дистанционно-управляемых устройств). Устройства для открывания окон должны быть расположены не выше 1,7 м от уровня площадки лестничной клетки или пола этажа. При этом количество и площадь открываемых створок в данных окнах не нормируется. Положениями СП[2] регламентируется только площадь остекления в каждом из проемов в наружных стенах лестничной клетки, а также размеры одного из габаритов остекленной части, но при этом не устанавливаются требования к размерам открываемых проемов. Аналогичным образом ранее действующие нормативные документы по пожарной безопасности также не регламентировали необходимые размеры открываемых проемов в наружных стенах лестничных клеток, что говорит об исторически сложившейся практике, при которой окна лестничных клеток при необходимости их проветривания вскрывались пожарными подразделениями.

Вместе с тем в настоящее время созданы объективные предпосылки для использования на лестничных клетках окон, позволяющих обеспечить необходимый режим проветривания путем открытия створок. Так, в ГОСТ[3] отражены требования СП[2] для оконных блоков лестничной клетки и необходимость реализации у данных блоков функции открывания в режиме интенсивного проветривания (поворотное или фрамужное открывание). Этот стандарт позволяет подобрать оконные блоки лестничной клетки с необходимой площадью открываемых проемов.

Эффективное проветривание лестничных клеток играет существенную роль в обеспечении безопасности людей при пожаре в жилых секционных зданиях высотой до 9 этажей включительно, построенных до 2020 г., т.е. до момента введения новых противопожарных требований СП[2], где выходы из квартир предусмотрены непосредственно на лестничную клетку. При пожаре в одной из квартир таких зданий продукты горения быстро распространяются на лестничную клетку, тем самым блокируя единственный путь эвакуации из других квартир. Далее происходит распространение продуктов горения из лестничной клетки в квартиру через неплотности квартирной двери, в результате чего жители, не имеющие возможности эвакуироваться, могут погибнуть не только на лестничной клетке, но и в квартирах. Подобные

[1] СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

[2] СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы.

[3] ГОСТ Р 56926–2016. Конструкции оконные и балконные различного функционального назначения для жилых зданий.

сценарии гибели людей имели место на практике, в том числе при пожаре в жилом 9-этажном здании в январе 2021 г. в Екатеринбурге (ул. Рассветная, 7), когда из-за распространения продуктов горения на лестничную клетку и далее в квартиры погибли 8 человек. При этом были спасены 90 человек, в том числе с помощью средств защиты органов дыхания — 52 человека. Для проветривания лестничной клетки пожарные вынуждены были разбивать окна, предварительно закрыв дверь квартиры, где находился очаг пожара.

Эффективное естественное проветривание лестничной клетки в таких жилых зданиях позволяет сократить продолжительность распространения опасных факторов пожара из лестничной клетки в квартиры до той величины, при которой опасные факторы пожара в квартире не превысят допустимых значений, а также обеспечить возможность безопасного перемещения жильцов из квартир наружу в сопровождении сотрудников пожарной охраны.

С учетом этого целью настоящей статьи является анализ технических решений по обеспечению естественного проветривания лестничных клеток типа Л1 в существующих секционных жилых зданиях высотой от 5 до 9 этажей.

Для достижения указанной цели в рамках статьи предусмотрена разработка критериев и математических соотношений, позволяющих оценить влияние различных технических решений на эффективность проветривания лестничных клеток

Кроме того, в статье предусмотрена апробация разработанных критериев и математических соотношений для оценки эффективности проветривания лестничных клеток в жилых зданиях высотой от 5 до 9 этажей как с помощью окон в наружных стенах, так и с помощью люков и дверей, обеспечивающих выходы на кровлю.

Критерии и математические соотношения для оценки эффективности проветривания лестничных клеток

Как было показано в [1], необходимый уровень противопожарной защиты лестничной клетки типа Л1 в существующих жилых зданиях считается обеспеченным при одновременном выполнении следующих условий:

- совокупность технических решений по защите лестничных клеток должна обеспечивать возможность безопасной эвакуации всех мобильных людей из любой квартиры;
- совокупность технических решений по защите лестничных клеток должна обеспечивать возможность безопасного спасения людей из любой квартиры по данной лестничной клетке.

Несанкционированное открытие оконных проемов в наружных стенах лестничных клеток при пожаре может привести к интенсификации процесса горения из-за поступающего в очаг пожара кислорода, вспышке недогоревших продуктов пиролиза, которые распространились из горящей квартиры на лестничную клетку и т.д.

С учетом этого проветривание лестничных клеток должно осуществляться подразделениями пожарной охраны с целью обеспечения возможности безопасного спасения людей из квартир по данной лестничной клетке на стадии, когда ликвидировано или ограничено поступление продуктов горения из горящей квартиры на лестничную клетку (т.е. имеется возможность безопасного перемещения людей мимо квартиры, в которой произошел пожар).

Поэтому оценка эффективности тех или иных решений по естественному проветриванию лестничной клетки проводится только для стадии спасения людей.

Исходя из этого, согласно [1], безопасность людей при спасении по лестничной клетке считается обеспеченной при выполнении следующих основных условий:

- опасные факторы пожара (далее по тексту — ОФП) в квартире с людьми, ожидающими спасения пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента начала спасения, а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность людей в квартире;
- ОФП на лестничной клетке, используемой для перемещения людей пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента окончания их перемещения наружу (в том числе с учетом средств защиты, используемых этими людьми или переданных им пожарными), а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность перемещения людей по лестничной клетке наружу.

Данные условия описываются соотношениями:

$$0{,}8\, t_{\text{бл.кв}} \geq T_{\text{н.сп}}; \qquad (1)$$

$$0{,}8\, t^{\text{сп}}_{\text{бл.кв}} \geq T_{\text{ок.сп}}, \qquad (2)$$

где $t_{\text{бл.кв}}$, $t_{\text{бл.лк}}$ — время блокирования квартиры, в которой расположен спасаемый человек, и лестничной клетки, используемой при спасении;

$T_{\text{н.сп}}$ — время начала спасения, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента прибытия в квартиру к спасаемому человеку подразделений пожарной охраны, определяемое согласно [1, 2];

$T_{ок.сп}$ — время окончания спасения человека из квартиры, осуществляемого подразделениями пожарной охраны по лестничной клетке, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента перемещения спасаемого на безопасное расстояние от горящего здания, определяется согласно [1, 2].

Блокирование квартир происходит путем распространения в них ОФП из лестничной клетки. При этом динамика изменения ОФП на лестничной клетке рассчитывается на основе математических моделей распространения пожара из горящей квартиры на лестничную клетку с использованием программных продуктов[4] [3, 4–10] и данных о предельно допустимых для людей значения ОФП[5] [3, 11, 12].

Время блокирования квартир $t_{бл.кв}$ при распространении ОФП из лестничной клетки через неплотности квартирной двери определяется на основе [13–18] с учетом величины удельного сопротивления дымопроницанию дверей и с учетом времени достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара $t_{огн}$ (время потери огнестойкости):

$$t_{бл.кв} = \min\left\{t_{кр}^{п.в}, t_{кр}^{T}, t_{кр}^{т.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{т.п}, t_{огн}\right\}. \quad (3)$$

Время блокирования лестничной клетки, используемой при спасении людей $t_{бл.лк}^{сп}$, определяется аналогично (3), при этом предельно допустимые значения ОФП для спасаемого человека определяются с учетом возможного использования им средств защиты.

В рамках расчета времени блокирования квартир и лестничной клетки согласно [1] определяется время достижения предельных состояний по огнестойкости несущих элементов здания и стен лестничных клеток при свободном развитии пожара $t_{огн}$ (время от начала пожара до момента потери огнестойкости) на основе расчетов их нагрева или расчета эквивалентной продолжительности пожара [19–21].

С учетом того, что данная статья посвящена естественному проветриванию лестничных клеток, анализ влияния фактора огнестойкости $t_{огн}$ в ней не предусмотрен, т.е. предполагается, что время достижения ОФП предельно допустимых значений в квартирах и на лестничной клетке меньше значения $t_{огн}$.

Как показал анализ, проведенный в [1], при пожаре в существующих жилых зданиях, квартиры которых имеют выходы на лестничную клетку, происходит быстрое блокирование этой лестничной клетки опасными факторами пожара, в результате чего жильцы будут вынуждены принять решение не эвакуироваться, а дожидаться спасения в квартирах, которые постепенно заполняются ОФП через неплотность дверей. При этом пожарные подразделения должны в короткие сроки достигнуть спасаемого человека и обеспечить его защиту от воздействия ОФП путем передачи ему средств защиты (изолирующего самоспасателя и т.д.), а также обеспечить сопровождение жильцов при перемещении наружу. Очевидно, что такая спасательная операция в многоэтажном жилом доме потребует значительного числа как пожарных, так и средств индивидуальной защиты.

С учетом этого естественное проветривание считается эффективным, если оно обеспечивает выполнение одновременно 2 перечисленных ниже критериев:

- проветривание обеспечивает предотвращение блокирования квартир опасными факторами пожара за счет их распространения из лестничной клетки в квартиру через неплотность дверей;
- проветривание обеспечивает такие временные интервалы окончания блокирования различных этажей лестничной клетки, при которых спасаемый человек по команде пожарных может не только безопасно (без средств защиты) переместиться из квартиры на лестничную клетку, но и безопасно переместиться по этой лестничной клетке наружу.

Для дальнейшего анализа с целью реализации инженерного подхода к оценке эффективности проветривания лестничной клетки представим $t_{бл.кв}$ лестничной клетки в виде суммы функций:

$$t_{бл.кв\,i} = t_{бл.пл\,i} + t_i^*, \quad (4)$$

где $t_{бл.кв\,i}$ — расчетное время блокирования ОФП квартиры, расположенной на i-м этаже, определенное без учета проветривания лестничной клетки;

$t_{бл.пл\,i}$ — время блокирования ОФП площадки i-го этажа;

t_i^* — интервал времени от момента блокирования опасными факторами пожара площадки i-го этажа до момента блокирования квартиры, имеющей выход на данную площадку.

Значение t_i^* зависит от величины удельного сопротивления дымопроницанию дверей квартиры S, площади (объема) квартиры, температуры воздуха снаружи, скорости и направления ветра и других факторов.

[4] Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2017)14. Investigating Heat and Smoke Propagation Mechanisms in Multi-Compartment Fire Scenarios Final Report of the PRISME Project. January 14, 2018. URL: www.oecd-nea.org

[5] ISO 13571:2012. Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.

Для квартир площадью 42 м^2 и S = 5500 м^3/кг, как показано в [1, 15], значение t^* составляет около 1040 с.

С учетом этого для реализации инженерного подхода с необходимым запасом можно принять для всех этажей t^* = 930 с.

При проветривании лестничной клетки время окончания блокирования опасными факторами пожара площадки i-го этажа будет равно $t_{\text{ок.бл.пл }i}$.

Очевидно, что если окончание блокирования (разблокирование) площадки i-го этажа от ОФП произойдет раньше расчетного времени блокирования квартиры, расположенной на i-м этаже $t_{\text{бл.кв }i}$, то находящийся в квартире человек не будет поражен ОФП и имеет возможность в сопровождении пожарных выйти из квартиры без использования средств защиты. Это условие описывается неравенством:

$$t_{\text{бл.кв }i} > t_{\text{ок.бл.пл }i}. \quad (5)$$

С учетом (4) получим:

$$t_{\text{бл.пл }i} + t_i^* > t_{\text{ок.бл.пл }i}$$

или

$$\Delta t_i = t_{\text{бл.пл }i} + t_i^* - t_{\text{ок.бл.пл }i} > 0. \quad (6)$$

Для обеспечения возможности безопасного перемещения из квартиры, расположенной на i-м этаже, по лестничной клетке наружу необходимо, чтобы к моменту окончания блокирования площадки лестничной клетки, расположенной на i-м этаже, произошло разблокирование площадок всех нижележащих этажей, что описывается неравенством:

$$t_{\text{ок.бл.пл }i} > \max\left(t_{\text{ок.бл.пл }1-(i-1)}\right). \quad (7)$$

Соотношения (6) и (7) являются математическими описаниями критериев, на основе которых оценивается возможность эффективного проветривания различных участков (групп этажей) лестничной клетки.

Если соотношения (6) и (7) выполняются для всех этажей лестничной клетки, то делается вывод о возможности эффективного проветривания лестничной клетки в целом.

Необходимо отметить, что обеспечение эффективного проветривания лестничной клетки или ее отдельных этажей не исключает необходимости подтверждения условий безопасного спасения (1) и (2) на основе положений [1, 2], в том числе с учетом необходимости обеспечения огнестойкости несущих элементов здания и стен лестничных клеток. Однако, поскольку данная статья посвящена естественному проветриванию лестничных клеток, анализ этих условий в ней не предусмотрен.

Оценка эффективности проветривания лестничной клетки

Оценка эффективности проветривания лестничных клеток проведена для существующих типовых секционных жилых зданий высотой 5, 7 и 9 этажей (серии 1-447 С-1 и I-515/9Ш), у которых выходы из квартир предусмотрены непосредственно на лестничную клетку, а очаг пожара находится на 1 этаже.

Основные временные интервалы действий пожарных подразделений принимались на основе [1].

При этом пожарными для обеспечения возможности безопасного перемещения людей мимо проема горящей квартиры на 15 мин пожара (через 4 мин после прибытия) предпринимаются действия по ограничению распространения продуктов горения на лестничную клетку (закрытие двери горящей квартиры, подача струй воды в прихожую и др.), а после этого — действия по проветриванию лестничной клетки путем открытия их наружных дверей, а также открытия створок окон и люков (дверей) выходов на кровлю.

В ходе расчетов варьировалась площадь открытого проема в свету в наружных стенах лестничных клеток (створок окон) от 1 до 2 м^2.

При расчетах принималось, что для проветривания лестничных клеток в каждом здании открываются створки всех окон, кроме окон 1-го этажа.

Размеры люков и дверей выходов на кровлю из лестничных клеток принимались равными 0,6 × 0,8 м и 0,75 × 1,5 м соответственно.

Время от момента входа пожарных в здание через 12 мин (720 с) от начала пожара до момента открытия створок окон и выходов на кровлю принималось:

- 210 с для створок и 240 с для выходов на кровлю в 5-этажном здании (930 и 960 с от начала пожара соответственно);
- 240 с для створок и для выходов на кровлю в 7-этажном здании (960 с от начала пожара);
- 240 с для створок и 270 с для выходов на кровлю в 7-этажном здании (960 и 990 с от начала пожара соответственно).

Для 5-этажного здания динамика изменения концентрации HCL, которая достигает предельно допустимых значений раньше остальных ОФП, показана на рис. 1, 2, а обобщенные результаты расчетов проветривания приведены в табл. 1.

Расчеты, представленные в табл. 1, показывают, что для каждого из 1–3 этажей время окончания блокирования соответствующих этажей при площади открытых проемов 2 м^2 не отличается от времени

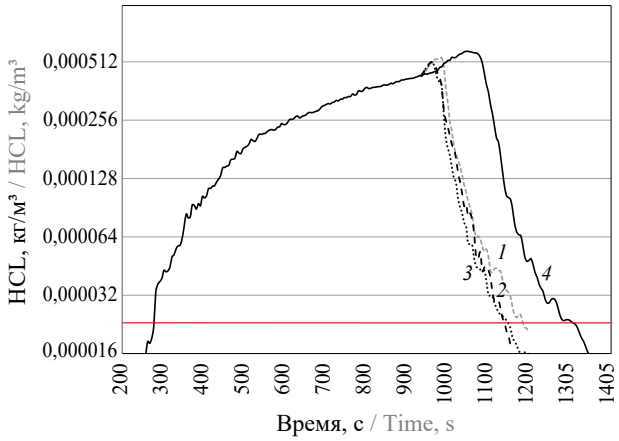


Рис. 1. Динамика изменения концентрации HCL на площадке 4-го этажа лестничной клетки 5-этажного здания: *1* — при площади открытого проема окна 1 м²; *2* — при площади открытого проема окна 2 м²; *3* — при площади открытого проема окна 1 м² и открытых проемах выходов на кровлю; *4* — при открытых проемах выходов на кровлю

Fig. 1. Dynamics of changes in the concentration of HCL on the site of the 4th floor stairwell of a five-story building: *1* — with an open window area of 1 m²; *2* — with an open window opening area of 2 m²; *3* — with an open window opening area of 1 m² and open openings for exits to the roof; *4* — with open openings of exits to the roof

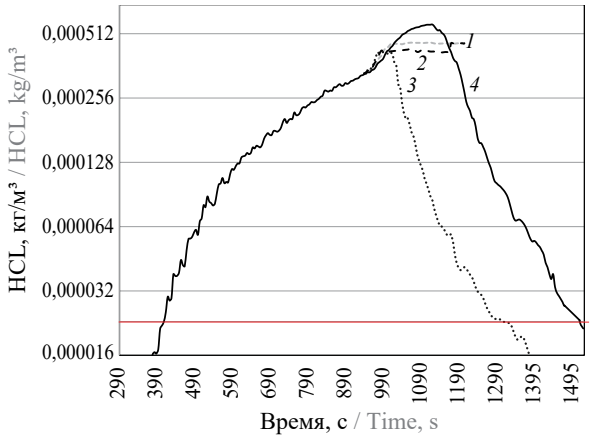


Рис. 2. Динамика изменения концентрации HCL на площадке 5-го этажа лестничной клетки 5-этажного здания: *1* — при площади открытого проема окна 1 м²; *2* — при площади открытого проема окна 2 м²; *3* — при площади открытого проема окна 1 м² и открытых проемах выходов на кровлю; *4* — при открытых проемах выходов на кровлю

Fig. 2. Dynamics of changes in the concentration of HCL on the site of the 5th floor stairwell of a five-story building: *1* — with an open window area of 1 m²; *2* — with an open window opening area of 2 m²; *3* — with an open window opening area of 1 m² and open openings for exits to the roof; *4* — with open openings of exits to the roof

окончания блокирования этих этажей при площади и открытых проемов 1 м², разница находится в пределах точности расчетов.

Для площадки 4-го этажа, как видно из рис. 1, время блокирования составляет $t_{\text{бл.пл }4}$ = 270 с, а время окончания блокирования этой площадки $t_{\text{ок.бл.пл }4}$ составляет 1190 и 1140 с при площади открытых проемов 1 и 2 м² соответственно (кривые *1* и *2*). Таким образом, интервал времени от момента открытия окон на 930 с до момента окончания блокирования площадки 4-го этажа составляет 260 с при площади открытых проемов 1 м² и 210 с при площади открытых проемов 2 м² (уменьшается на 20 %).

Из табл. 1 видно, что неравенства (6) и (7) для 1–4 этажей выполняются даже при площади открытых проемов 1 м², что говорит о том, что для обеспечения эффективного проветривания этих этажей достаточно обеспечить площади открытых проемов на каждом этаже 1 м².

Дополнительное открытие люка выхода на кровлю, как видно из рис. 1, влияет на время окончания блокирования 4-го этажа аналогично увеличению площади открытых проемов до величины 2 м².

Таблица 1. Параметры проветривания лестничной клетки в 5-этажном здании

Table 1. Stairwell ventilation parameters in a 5-storey building

Этаж Floor	Время блокирования $t_{\text{бл.пл}}$, с Block time $t_{bl.l}$, s	Значения $t_{\text{ок.бл.пл}}$ и Δt при открытых проемах и выходах на кровлю Values $t_{end\ bl.l}$ and Δt for open openings and exits to the roof					
		Площадь проема 1 м² Opening area 1 m²		Площадь проема 2 м² Opening area 2 m²		Площадь проема 1 м² и выходы на кровлю Opening area and exits to the roof 1 m²	
		$t_{\text{ок.бл.пл}}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{\text{ок.бл.пл}}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{\text{ок.бл.пл}}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s
1	85	965	50	970	45	960	55
2	130	1015	45	1010	50	1025	35
3	190	1075	45	1080	40	1065	55
4	270	1190	10	1140	60	1150	50
5	405	–	< 0	–	< 0	1300	35

Анализ рис. 2 показывает, что время блокирования площадки 5-го этажа составляет $t_{бл.пл\ 5}$ = 405 с, а открытие проемов площадью 1 или 2 м^2 не приводит к снижению концентрации HCL из-за того, что верхнее окно в существующих зданиях расположено ниже анализируемой отметки этого этажа. При этом незначительное увеличение концентрации HCL вызвано подъемом продуктов горения с более высокой концентрацией вверх при открытии окна.

В случае, если дополнительно к открытым проемам площадью 1 м^2 будут открыты проемы выхода на кровлю (люки), то время окончания блокирования площадки составит $t_{ок.бл.пл\ 5}$ = 1300 с. При этом будет обеспечено выполнение неравенств (6) и (7), т.е. обеспечена необходимая эффективность проветривания 5-го этажа, поскольку $\Delta t_5 > 0$ (см. табл. 1).

Расчеты (см. табл. 1) показывают, что при открытии проемов площадью 1 м^2 и выходов на кровлю неравенство (6) выполняется для 1–5 этажей, а время окончания блокирования этих этажей составляет 960, 1025, 1065, 1150 и 1300 с соответственно. С учетом этого условие (7) выполняется и можно сделать вывод, что при открытии проемов площадью 1 м^2 и люков выходов на кровлю будет обеспечена необходимая эффективность проветривания всей лестничной клетки 5-этажного жилого здания.

Из рис. 1 и 2 видно, что открытие только люков выходов на кровлю значительно менее эффективно, чем открытие окон. Это техническое решение не обеспечивает выполнение неравенства (6), т.е. не обеспечивает эффективного проветривания.

Для 7-этажного здания результаты расчетов динамики изменения концентрации HCL на верхнем этаже показаны на рис. 3, а параметры проветривания — в табл. 2.

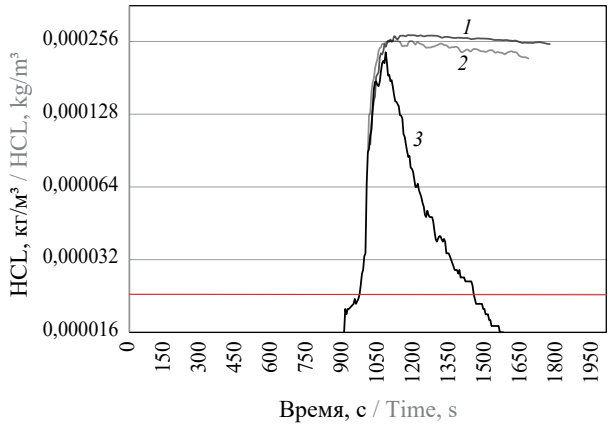


Рис. 3. Динамика изменения концентрации HCL на площадке 7-го этажа лестничной клетки 7-этажного здания: *1* — при площади открытого проема окна 1 м^2; *2* — при площади открытого проема окна 2 м^2; *3* — при площади открытого проема окна 1 м^2 и открытых проемах выходов на кровлю
Fig. 3. Dynamics of changes in the concentration of HCL on the site of the 7th floor stairwell of a seven-story building: *1* — with an open window area of 1 m^2; *2* — with an open window opening area of 2 m^2; *3* — with an open window opening area of 1 m^2 and open openings for exits to the roof

Как видно из табл. 2, для каждого из 1–6 этажей время окончания блокирования соответствующих этажей при открытии проемов площадью 2 м^2 не отличается от времени окончания блокирования этих этажей при открытии проемов площадью 1 м^2 (разница находится в пределах точности расчетов). При этом неравенство (6) выполняется для 1–6 этажей даже при открытии проемов площадью 1 м^2, что говорит о возможности эффективного проветривания этих этажей при площади открытых проемов 1 м^2.

Вместе с тем анализ табл. 2 показывает, что наибольшее влияние площадь открытых проемов оказывает на время блокирования площадки 6-го этажа. Время блокирования площадки 6-го этажа

Таблица 2. Параметры проветривания лестничной клетки в 7-этажном здании
Table 2. Stairwell ventilation parameters in a 7-storey building

Этаж Floor	Время блокирования $t_{бл.пл}$, с Block time $t_{bl.l}$, s	Значения $t_{ок.бл.пл}$ и Δt при открытых проемах и выходах на кровлю Values $t_{end\ bl.l}$ and Δt for open openings and exits to the roof					
		Площадь проема 1 м^2 Opening area 1 m^2		Площадь проема 2 м^2 Opening area 2 m^2		Площадь проема 1 м^2 и выходы на кровлю Opening area and exits to the roof 1 m^2	
		$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s
1	95	965	60	960	65	960	65
2	140	1005	65	995	75	990	80
3	200	1065	65	1075	55	1060	70
4	290	1145	75	1140	80	1130	90
5	415	1215	130	1215	130	1200	145
6	620	1355	195	1290	260	1285	265
7	965	–	< 0	–	< 0	1455	440

составляет $t_{бл.пл\ 6}$ = 620 с, а время окончания блокирования этой площадки $t_{ок.бл.пл\ 6}$ составляет 1355 и 1290 с при открытии проемов площадью 1 и 2 м^2 соответственно (кривые *1* и *2*). Таким образом, интервал времени от момента открытия створок окон на 960-й с до момента окончания блокирования площадки 4-го этажа составляет 395 с при открытии проемов площадью 1 м^2 и 330 с при открытии проемов площадью 2 м^2 (уменьшается на 17 %).

Неравенство (6) для 6-го этажа выполняется даже при открытии проемов площадью 1 м^2 ($\Delta t_6 > 0$), что говорит о том, что для обеспечения эффективного проветривания этого этажа необходимо обеспечить площадь открытых проемов 1 м^2.

Необходимо отметить, что дополнительное открытие люка выхода на кровлю практически не оказывает существенного влияния на время окончания блокирования 6-го этажа по сравнению с открытием проемов площадью 2 м^2.

Анализ рис. 3 показывает, что время блокирования площадки 7-го этажа составляет $t_{бл.пл\ 7}$ = 850 с, а открытие проемов площадью 1 и 2 м^2 не приводит к снижению концентрации HCL из-за того, что окно в существующем здании расположено ниже анализируемой отметки этого этажа.

В случае, если дополнительно к открытию проемов площадью 1 м^2 будут открыты проемы выхода на кровлю (люки), то время окончания блокирования площадки 7-го этажа составит $t_{ок.бл.пл\ 7}$ = 1455 с. При этом будет обеспечено выполнение неравенств (6) и (7), т.е. обеспечена необходимая эффективность проветривания 7-го этажа, поскольку $\Delta t_7 > 0$ (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2, неравенства (6) и (7) при открытии проемов площадью 1 м^2 на всех этажах и открытии выходов на кровлю выполняются для 1–7 этажей. С учетом этого можно сделать вывод, что при открытии проемов площадью 1 м^2 на всех этажах и люков выходов на кровлю будет обеспечена необходимая эффективность проветривания всей лестничной клетки 7-этажного жилого здания.

Для 9-этажного здания результаты расчетов динамики изменения концентрации HCL показаны на рис. 4, а параметры проветривания — в табл. 3.

Анализ этих данных показывает, что для каждого из 1–5-го, а также 7-го этажа время окончания блокирования при открытии проемов площадью 2 м^2 не отличается от времени окончания блокирования этих этажей при открытии проемов площадью 1 м^2 (разница находится в пределах точности расчетов), а для 6 и 8-го этажей влияние открытия проемов площадью 2 м^2 более существенно.

Из табл. 3 видно, что время блокирования площадки 6-го этажа составляет $t_{бл.пл\ 6}$ = 575 с, а время окончания блокирования этой площадки $t_{ок.бл.пл\ 6}$ составляет 1360 и 1290 с при открытии проемов площадью 1 и 2 м^2 соответственно. Таким образом, интервал времени от момента открытия створок окон на 960-й с до момента окончания блокирования площадки 6-го этажа составляет 400 с при открытии проемов площадью 1 м^2 и 330 с при открытии проемов площадью 2 м^2 (уменьшается на 17 %).

Аналогичным образом время блокирования площадки 8-го этажа составляет $t_{бл.пл\ 8}$ = 1025 с, а время окончания блокирования этой площадки $t_{ок.бл.пл\ 8}$ составляет 1640 и 1555 с при открытии проемов площадью 1 и 2 м^2 соответственно (кривые *1* и *2*).

Таким образом, интервал времени от момента открытия створок окон на 960-й с до момента окончания блокирования площадки 8-го этажа составляет 680 с при открытии проемов площадью 1 м^2 и 595 с при открытии проемов площадью 2 м^2 (уменьшается на 13 %).

Несмотря на эти эффекты неравенство (6) для 6 и 8-го этажей выполняется даже при открытии проемов площадью 1 м^2 ($\Delta t_8 > 0$), что говорит о том, что для обеспечения эффективного проветривания этого этажа необходимо обеспечить площадь открытых проемов 1 м^2.

Необходимо отметить, что дополнительное открытие люка выхода на кровлю оказывает некоторое влияние на время окончания блокирования этажа по сравнению с открытием проемов площадью 2 м^2 на этом этаже только для 8-го этажа.

Как видно из табл. 3, неравенство (6) выполняется для 1–8-го этажей, что говорит о возможности эффективного проветривания этих этажей при площади открытого проема 1 м^2.

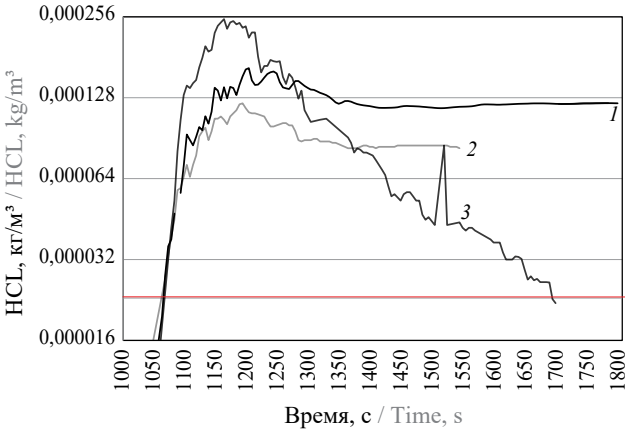


Рис. 4. Динамика изменения концентрации HCL на площадке 9-го этажа лестничной клетки 9-этажного здания: *1* — при площади открытого проема окна 1 м^2; *2* — при площади открытого проема окна 2 м^2; *3* — при площади открытого проема окна 1 м^2 и открытых проемах выходов на кровлю

Fig. 4. Dynamics of changes in the concentration of HCL on the site of the 9th floor staircase of a nine-storey building: *1* — with an open window area of 1 m^2; *2* — with an open window opening area of 2 m^2; *3* — with an open window opening area of 1 m^2 and open openings for exits to the roof

Таблица 3. Параметры проветривания лестничной клетки в 9-этажном здании
Table 3. Stairwell ventilation parameters in a 9-storey building

Этаж Floor	Время блокирования $t_{бл.пл}$, с Block time $t_{bl.l}$, s	Значения $t_{ок.бл.пл}$ и Δt при открытых проемах и выходах на кровлю Values $t_{end\ bl.l}$ and Δt for open openings and exits to the roof					
		Площадь проема 1 м² Opening area 1 m²		Площадь проема 2 м² Opening area 2 m²		Площадь проема 1 м² и выходы на кровлю Opening area and exits to the roof 1 m²	
		$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s	$t_{ок.бл.пл}$, с $t_{end\ bl.l}$, s	Δt, с Δt, s
1	90	985	35	985	35	985	35
2	130	1015	45	1010	50	1020	40
3	185	1080	35	1105	10	1090	25
4	265	1180	15	1175	20	1170	25
5	401	1280	51	1245	70	1240	86
6	560	1305	185	1290	215	1355	135
7	805	1445	290	1375	349	1370	365
8	1005	1565	370	1555	400	1485	450
9	1080	–	< 0	–	< 0	1635	375

Анализ рис. 4 показывает, что время блокирования площадки 9-го этажа составляет $t_{бл.пл\ 9} = 1080$ с, а открытие проемов площадью 1 и 2 м² не приводит к снижению концентрации HCL из-за того, что окно в существующем здании расположено ниже анализируемой отметки этого этажа.

В случае, если дополнительно к открытию проемов площадью 1 м² будут открыты проемы выхода на кровлю (люки), то время окончания блокирования площадки 9-го этажа составит $t_{ок.бл.пл\ 7} = 1802$ с. При этом будет обеспечено выполнение неравенств (6) и (7), т.е. обеспечена необходимая эффективность проветривания 9-го этажа, поскольку $\Delta t_9 > 0$.

Как видно из табл. 3, неравенство (6) при открытии проемов площадью 1 м² на всех этажах и открытии выходов на кровлю выполняется для 1–9-го этажей, а соотношение временных интервалов окончания блокирования этих этажей соответствует условиям (7). С учетом этого условия (6) и (7) выполняются и можно сделать вывод, что при открытии проемов площадью 1 м² и люков выходов на кровлю будет обеспечена необходимая эффективность проветривания лестничной клетки 9-этажного жилого здания.

Выводы

Положениями существующих и ранее действующих нормативных документов предусмотрена необходимость обеспечения возможности проветривания лестничных клеток типа Л1 за счет открытия окон в их наружных стенах. При этом не регламентируются требования к площади открываемых проемов в данных окнах, а также отсутствуют положения о возможности использования для проветривания лестничных клеток проемов, предназначенных для выхода из лестничных клеток на кровлю. Отсутствуют также теоретические положения, позволяющие сформулировать требования к техническим решениям по проветриванию лестничных клеток и провести оценку эффективности этих решений.

Вместе с тем анализ пожаров с гибелью людей в секционных жилых домах, в которых выходы из квартир предусмотрены непосредственно на обычную лестничную клетку, показывает, что проветривание лестничной клетки в таких зданиях может существенно повысить безопасность людей при их спасении пожарными подразделениями и сократить количество необходимых для спасения людей средств защиты органов дыхания.

Представленные в статье критерии предполагают, что проветривание обычной лестничной клетки в секционных жилых домах, у которых выходы из квартир предусмотрены непосредственно на эту лестничную клетку, будет эффективным в случае, если оно позволяет ограничить продолжительность блокирования каждого ее этажа опасными факторами пожара до момента, при котором произойдет достижение ОФП в квартирах этого этажа предельно допустимых значений, а время окончания блокирования каждого нижележащего этажа меньше соответствующего времени окончания блокирования вышележащего этажа.

Реализация данных критериев позволяет обеспечить возможность спасения людей из квартир соответствующего этажа пожарными подразделениями без применения значительного числа средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения и без привлечения значительного числа пожарных, поскольку находящийся в квартире человек не будет поражен опасными факторами пожара и может в сопровождении пожарных выйти из квартиры наружу без использования средств защиты органов дыхания.

Математическое описание разработанных критериев, разработанное в рамках подготовки статьи, позволило провести расчетную оценку влияния различных технических решений на эффективность проветривания обычной лестничной клетки в существующих типовых жилых зданиях высотой от 5 до 9 этажей.

Данные расчеты показали, что возможность эффективного проветривания всех этажей этих зданий, кроме верхнего, обеспечивается при наличии открытого проема на каждом этаже площадью не менее 1 м^2.

При этом не обеспечивается проветривание верхних этажей, поскольку в существующих жилых зданиях с обычными лестничными клетками верхнее окно расположено ниже необходимого для проветривания уровня.

Поэтому для проветривания верхних этажей предложено использовать проемы выходов на кровлю. Проведенные расчеты подтвердили эффективность данного решения.

На основе результатов расчетов установлено, что для анализируемых типовых секционных жилых зданий (серии 1-447 С-1 и I-515/9Ш) при их реконструкции или ремонте необходимо устанавливать оконные блоки, все створки которых открываются полностью и обеспечивают площадь открытого проема в свету не менее 1,2 м^2, а люки выходов на кровлю предусмотреть с механизмами или приводами, обеспечивающими их полное открывание.

При этом управляющими компаниями должна быть обеспечена работоспособность устройств для открывания окон и люков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пехотиков А.В., Иващук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А.* Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 36. № 2. С. 59–70. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70
2. *Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Белосохов И.Р.* Эвакуация и поведение людей при пожарах : учебное пособие. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.
3. 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.
4. *McGrattan K., Miles S.* Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
5. *Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56.
6. *Дроздов Д.С., Дроздова Т.И.* Графическое моделирование для оценки опасных факторов пожара // Техногенная и природная безопасность : сб. науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 24–26 апреля 2019 г. / под ред. С.М. Рогачевой, А.С. Жутова, И.М. Учаевой. Саратов : Амирит, 2019. С. 69–73.
7. *Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф., Бокарев А.И., Денисова Е.С.* Прогнозирование динамики тепломассообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
8. *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.* Fire dynamics simulator user's guide. National Institute of Standards and Technology, 2019. 288 p. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=913619
9. *Gilbert S.* Human behavior in home fires. Technical Note (NIST TN). Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology. 2021. DOI: 10.6028/NIST.TN.2191
10. *Zhang T., Wang Z., Wong H., Tam W., Huang X.B., Xiao F.* Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
11. *Leventon I.T., Bonny J.W.* Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk // Interflam 2019. London, 2020. DOI: 10.1002/fam.2857
12. *Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L.* Modelling and influencing human behaviour in fire // Fire and Materials. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 412–430. DOI: 10.1002/fam.2391

13. *Матюшин А.В., Гомозов А.В., Иващук Р.А.* Моделирование динамики опасных факторов пожара в помещениях с людьми, нуждающимися в спасении, с учетом наличия неплотностей в притворах дверей // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 63–68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20929304
14. *Матюшин А.В., Гомозов А.В., Иващук Р.А.* Методика расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях при наличии неплотностей в притворах дверей (щелей) // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 92–100. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25064046
15. *Пехотиков А.В., Гомозов А.В., Усолкин С.В., Иващук Р.А.* Оценка возможности спасения людей при пожаре в жилом здании // Пожарная безопасность. 2021. № 3 (104). С. 86–96. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010
16. *Пехотиков А.В., Иващук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А.* Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 84–95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95
17. *Saarinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H.* Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — validation by using tracer gases and simulated smoke videos // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. Issue 7. P. e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
18. *Martin D., McLaughlin B., Arup P.E.* Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke. San Francisco, 2018. URL: https://www.nfpa.org//-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFInfluenceGapSizeAroundSwingingDoors.pdf
19. *Zhang C., Asif U.* Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 78. Pp. 85–96. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.08.006
20. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гордиенко Д.М.* Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 31–39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23092671
21. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения : рекомендации. М. : ВНИИПО, 1988. 56 с.

REFERENCES

1. Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomozov A.V., Luchkin S.A. Analysis of engineering solutions for the fire protection of conventional stairwells during the reconstruction of residential buildings of sectional type. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 36(2):59-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70 (rus).
2. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., Kudrin I.S., Istratov R.N., Belosokhov I.R. *Evacuation and behavior of people in case of fires : textbook*. Allowance. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2015; 262. (rus).
3. *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, VNIIPO, 2016; 79.
4. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed*. Society of Fire Protection Engineers, 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
5. Yarosh A.S., Chalatashvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. The system of buildings and structures dangerous fire factors development mathematical models alysis. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry*. 2019; 1:50-56. (rus).
6. Drozdov D.S., Drozdova T.I. Graphic modeling for assessing fire hazards. *Technogenic and natural safety : collection of scientific papers of the V International Scientific and Practical Conference. Saratov, April 24–26, 2019*. C.M. Rogacheva, A.S. Zhutova, I.M. Uchaeva (ed.). Saratov, Amirit Publ., 2019; 69-73. (rus).
7. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Forecasting the dynamics of heat and mass transfer processes during fires in typical multi-storey residential buildings. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15 (rus).
8. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire dynamics simulator user's guide*. National Institute of Standards and Technology, 2019; 288. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=913619
9. Gilbert S. *Human behavior in home fires. Technical Note (NIST TN)*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2021. DOI: 10.6028/NIST.TN.2191
10. Zhang T., Wang, Z., Wong H., Tam W., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
11. Leventon I.T., Bonny J.W. Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk. *Interflam 2019*. London, 2020. DOI: 10.1002/fam.2857

12. Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and influencing human behaviour in fire. *Fire and Materials*. 2017; 41(5):412-430. DOI: 10.1002/fam.2391
13. Matyushin A.V., Gomozov A.V., Ivashchuk R.A. Simulation of dynamics of dangerous fire factors in premises with people in need of rescue, taking into account the frame ledge of doors. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2013; 4:63-68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20929304 (rus).
14. Matyushin A.V., Gomozov A.V., Ivashchuk R.A. Design procedure of dynamics of dangerous factors of fire in rooms in the presence of loose-fitting doors (narrow slots). *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 4:92-100. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25064046 (rus).
15. Pekhotikov A.V., Gomozov A.V., Usolkin S.V., Ivashchuk R.A. Evaluation of the possibility of saving people in a fire in a residential building. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2021; 3(104):86-96. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010 (rus).
16. Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomozov A.V., Luchkin S.A. Analyzing the influence of the fire resistance of building structures on human safety in case of a fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):84-95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95 (rus).
17. Saarinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H. Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — validation by using tracer gases and simulated smoke videos. *PLoS ONE*. 2015; 10(7):e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
18. Martin D., McLaughlin B., Arup P.E. *Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke*. San Francisco, 2018. URL: https://www.nfpa.org//-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFInfluenceGapSizeAroundSwingingDoors.pdf
19. Zhang C., Asif U. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire. *Fire Safety Journal*. 2015; 78:85-96. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.08.006
20. Shebenko Yu.N., Shebeko A.Yu., Gordienko D.M. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:31-39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23092671 (rus).
21. *Methods for calculating the temperature regime of a fire in the premises of buildings for various purposes : Recommendations*. Moscow, VNIIPO Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1988; 56. (rus).

Поступила 30.03.2023, после доработки 19.04.2023;
принята к публикации 24.04.2023
Received March 30, 2023; Received in revised form April 19, 2023;
Accepted April 24, 2023

Информация 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

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт

Information about the author

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, VNIIPO, 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, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.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

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

ЛУЧКИН Сергей Алексеевич, младший 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: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9660-9221, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Sergey A. LUCHKIN, Junior 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, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А. Анализ производственного травматизма и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.) : монография науч. ред. В.И. Евдокимов ; Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. СПб. : ИПЦ «Измайловский», 2022. 138 с. (Серия «Заболеваемость военнослужащих» ; вып. 18).

В подготовке разделов монографии принимали участие: Ю.В. Гудзь, А.А. Ветошкин, П.В. Локтионов, Д.Ф. Магданов, В.А. Маштаков, Н.А. Панкратов.

ISBN 978-5-00182-034-5. Табл. 53, рис. 67, библиогр. 28 назв. тираж 500 экз.

Проанализированы травмы, в том числе фатальные, связанные с исполнением служебных обязанностей, у личного состава (сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) Федеральной противопожарной службой (ФПС) МЧС России за 15 лет (2006–2020 гг.).

Полученные травмы соотнесены с причинами (технические, организационные, психофизиологические и опасные факторы пожаров) и 16 обстоятельствами, деятельностью личного состава ФПС МЧС России (тушение пожаров, учебно-спортивная и повседневная) и категориями (оперативный состав, профилактический, технический и управленческий персонал, сотрудники и работники). В связи с невысокими показателями производственного травматизма по некоторым обстоятельствам его уровень рассчитали на 10 тыс. человек, гибели — на 100 тыс.

Среднегодовой уровень производственного травматизма личного состава был (14,66 ± 2,01) на 10 тыс. человек, гибели — (8,53 ± 0,83) на 100 тыс. человек. В динамике отмечается уменьшение уровня производственного травматизма и гибели в ФПС МЧС России.

Монография будет полезна для широкого круга специалистов, занимающихся вопросами охраны труда, профилактики травматизма в подразделениях МЧС России и в целом по стране. Полная версия книги содержится на сайте Научной электронной библиотеки (eLIBRARY ID: 49594825). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49594825

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 82–92
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):82-92

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84:616.001

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.82-92

Региональные риски производственных травм и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.)

Владимир Иванович Евдокимов[1]✉, Евгений Васильевич Бобринев[2], Андрей Александрович Кондашов[2], Юрий Владимирович Гудзь[1], Елена Юрьевна Удавцова[2]

[1] Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

[2] 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. Высокий уровень напряжения физических и психофизиологических резервов организма у пожарных вероятностно способствует возникновению у них ошибочных действий и травм. Производственный травматизм — показатель безопасности деятельности, его исключить полностью нельзя, травматизм можно только минимизировать.

Цель. Качественная оценка производственных рисков травматизма и гибели личного состава (сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) Федеральной противопожарной службы (ФПС) МЧС России по федеральным округам и регионам России.

Методы. За 15 лет (2006–2020 гг.) у личного состава ФПС МЧС России учтены 3758 травм при исполнении служебных обязанностей, из них 224 смертельных. Риск производственного травматизма рассчитали на 10 тыс. (10^{-4}) человек, риск гибели — на 100 тыс. (10^{-5}). Оптимальным риском считали показатели, которые на 1/3 были меньше средних данных по ФПС МЧС России, повышенным — больше на 1/3, допустимым — при промежуточных значениях.

Результаты и их обсуждение. Среднегодовой риск производственного травматизма личного состава ФПС МЧС России составил $(14{,}66 \pm 2{,}01) \cdot 10^{-4}$ травм/(человек · год). Оптимальный риск травматизма был в Сибирском федеральном округе и в 24 регионах России, повышенный — в Дальневосточном, Северо-Кавказском федеральных округах и в 23 регионах, допустимый — в остальных федеральных округах и регионах. Среднегодовой риск гибели личного состава ФПС МЧС России составил $(8{,}53 \pm 1{,}00) \cdot 10^{-5}$ смертей/(человек · год). Оптимальный риск гибели был в Сибирском федеральном округе и в 35 регионах России, повышенный — в Северо-Кавказском федеральном округе и в 19 регионах, допустимый — в остальных федеральных округах и регионах.

Выводы. Необходим учет и анализ всех случаев производственных травм с участием руководителей, специалистов охраны труда, инженеров, пожарных и врачей для выработки мероприятий по их профилактике.

Ключевые слова: пожар; чрезвычайная ситуация; пожарный; производственный травматизм; охрана труда

Для цитирования: *Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Гудзь Ю.В., Удавцова Е.Ю.* Региональные риски производственных травм и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 82–92. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.82-92

✉ *Евдокимов Владимир Иванович*, e-mail: 9334616@mail.ru

Regional risks of occupational injuries and death of personnel of the Federal Firefighting Service of the Emercom of Russia (2006–2020)

Vladimir I. Evdokimov[1]✉, Evgeniy V. Bobrinev[2], Andrey A. Kondashov[2], Yuriy V. Gudz[1], Elena Yu. Udavtsova[2]

[1] Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation

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

 © В.И. Евдокимов, Е.В. Бобринев, А.А. Кондашов, Ю.В. Гудзь, Е.Ю. Удавцова, 2023

ABSTRACT

Introduction. A high level of tension of physical and psychophysiological reserves of an organism which firefighters are exposed to probably contributes to the occurrence of erroneous actions and injuries. Occupational injuries are an indicator of the safety of activity, it cannot be excluded completely, injuries can only be minimized. The purpose of this article is to carry out a qualitative assessment of the occupational risks of injuries and death of personnel, employees with special ranks, and workers of the Federal Firefighting Service (FFS) of the Emercom of Russia in federal districts and regions of Russia.

Methods. Over the 15 years (2006–2020) 3,758 injuries in the performance of official duties were recorded considering the personnel of the Federal Firefighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 224 of them were fatal. The risk of occupational injuries was calculated per 10 thousand (10^{-4}) people, the risk of death was calculated per 100 thousand (10^{-5}). Optimal risk was considered to be those indicators that were 1/3 less than the average for the FFS of the EMERCOM of Russia, increased — more than 1/3, acceptable — with intermediate values.

Results and discussion. The average annual risk of occupational injuries of the personnel of the FFS of the EMERCOM of Russia was $(14.66 \pm 2.01) \cdot 10^{-4}$ injuries/(person per year). The optimal risk of injuries was in the Siberian Federal District and in 24 regions of Russia, increased — in the Far Eastern, North Caucasus Federal District and in 23 regions, acceptable — in other federal districts and regions. The average annual risk of death of the personnel of the FFS of the EMERCOM of Russia was $(8.53 \pm 1.00) \cdot 10^{-5}$ deaths/(person · year). The optimal risk of death was in the Siberian Federal District and in 35 regions of Russia, elevated — in the North Caucasus Federal District and in 19 regions, acceptable — in other federal districts and regions.

Conclusions. It is necessary to take into account and analyze all cases of occupational injuries with the participation of chiefs, occupational safety specialists, engineers, firefighters and doctors in order to develop measures to prevent them.

Keywords: fire; emergency; firefighter; occupational injury; occupational safety

For citation: Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Gudz Yu.V., Udavtsova E.Yu. Regional risks of occupational injuries and death of personnel of the Federal Firefighting Service of the Emercom of Russia (2006–2020). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):82-92. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.82-92 (rus).

✉ *Vladimir Ivanovich Evdokimov*, e-mail: 9334616@mail.ru

Введение

Производственный травматизм — количество травм, полученных работающими, в том числе смертельных, при выполнении профессиональных обязанностей за определенный промежуток времени, обычно за 1 год. Производственный травматизм — важный показатель безопасности деятельности.

По данным Международной организации труда (The International Labour Organization), ежегодно в мире умирают от несчастных случаев на производстве и профессиональных болезней 2,78 млн человек, в том числе от смертельных травм — 400 тыс. человек и около 374 млн человек получают несмертельные производственные травмы [1–3].

Экономические издержки, связанные с производственными травмами и заболеваниями, по оценкам стран, варьируют от 1,8 до 6,0 % от внутреннего валового продукта, по усредненным данным Международной организации труда, составляют около 4 % [4, 5]. Проблемы производственного травматизма актуальны также для экономики России [6–9].

В связи с высокой значимостью вопросы производственного травматизма у пожарных изучаются учеными. В интернет-опросе 437 пожарных некоторых восточных штатов США выявлено, что 66 % из них в течение производственной деятельности имели травмы [10], а 27 % заявили, что случаи производственных травм были в течение последних 12 мес. [11]. Чаще всего получали травмы, в том числе множественные, пожарные со стажем работы более 17 лет ($p < 0,05$).

При обследовании 1503 пожарных из 29 пожарных депо Польши, получивших травмы, выявлено, что 40 % травм произошло на занятиях по физической подготовке и только 25 % — при проведении аварийно-спасательных работ. Показано, что частота травм значимо не зависит от возраста пожарных, но в то же время установлено, что увеличение сроков нетрудоспособности зависит от увеличения возраста пожарных [12].

Критический обзор сведений, представляемый в публикациях по травматизму при пожаротушении и его профилактике, содержится в метаобзоре [13]. Зарегистрированные показатели травм у пожарных варьировались от 9 до 74 % случаев, причем среди анатомических частей больше всего поражались нижние конечности и спина. В статье проведено сравнение производственных травм с другими специалистами экстремальных профессий.

Высчитанный авторами производственный риск травматизма и гибели профессиональных пожарных и волонтеров за 14 лет (2006–2019 гг.) в 33 странах с разной полнотой сведений, по годовым отчетам Центра пожарной статистики (Center of Fire Statistics, CTIF) Международной ассоциации пожарно-спасательных служб (International Association of Fire and Rescue Services) [14], составил $(72,16 \pm 3,44) \cdot 10^{-4}$

травм/(человек · год) и (2,39 ± 0,29) · 10^{-5} смертей/(человек · год) [15].

Высокий уровень травматизма наблюдался у пожарных США. Например, в 2016 г. производственные травмы получили более 30 тыс. пожарных, а 60 человек погибли [16]. По данным [17], в 2003–2014 гг. уровень производственного травматизма был 260 · 10^{-4} травм/(пожарных · год), в том числе у профессиональных пожарных — 699 · 10^{-4}, у добровольцев — 39 · 10^{-4} травм/(пожарных · год). 38 % травм возникли во время пожаротушения, 7 % — в период тренировок, 7 % — при спасении пострадавших.

Оказалось, что риск травматизма в пожарно-спасательных службах мира был статистически достоверно больше ($p < 0{,}001$), чем у личного состава Федеральной противопожарной службы (ФПС) Государственной противопожарной службы МЧС России, а гибели — меньше ($p < 0{,}001$) [15]. Риск — вероятность возникновения какого-либо события, как правило негативного. Зная количество рискуемых лиц, можно вычислить показатель риска. Например, среднегодовое количество изученного личного состава ФПС МЧС России было 177,4 ± 8,5 тыс. человек.

В предыдущих изданиях авторами представлены риски производственного травматизма и гибели личного состава ФПС МЧС России с 2006 по 2020 г. [15, 18–20]. В этот период были учтены 3758 травм при исполнении служебных обязанностей, из них 224 — смертельных. Риск производственного травматизма составил (14,66 ± 2,01) · 10^{-4} травм/(человек · год). В изучаемый период риск производственного травматизма у мужчин-работников России был статистически достоверно бóльшим — (22,73 ± 2,01) · 10^{-4} травм/(человек · год) ($p < 0{,}001$).

Полиномиальные тренды производственного травматизма личного состава ФПС МЧС России и мужчин-работников при высоких коэффициентах детерминации демонстрировали уменьшение показателей (рис. 1, *a*). Конгруэнтность трендов рисков травматизма — сильная, положительная и статистически значимая ($r = 0{,}827$; $p < 0{,}001$), что может указывать на влияние в развитии рисков травматизма одинаковых (однонаправленных) факторов [18].

Среднегодовой риск гибели личного состава ФПС МЧС России был (8,53 ± 1,00) · 10^{-5} смертей/(человек · год), у мужчин-работников России — статистически достоверно больше — (13,23 ± 1,12) · 10^{-5} ($p < 0{,}01$) [18]. Полиномиальные тренды риска гибели личного состава ФПС МЧС России и мужчин-работников при разных по значимости коэффициентах детерминации показывали уменьшение данных (см. рис. 1, *b*). Конгруэнтность трендов рисков гибели — низкая и статистически не значимая ($r = 0{,}228$; $p > 0{,}05$), что может указывать на влияние в развитии рисков разных (однонаправленных) факторов.

В предыдущей статье авторами были указаны региональные риски травматизма оперативных подразделений МЧС России за 2012–2021 гг. [20].

Цель — представить региональные риски травматизма и гибели личного состава ФПС МЧС России за 15 лет с 2006 по 2020 г.

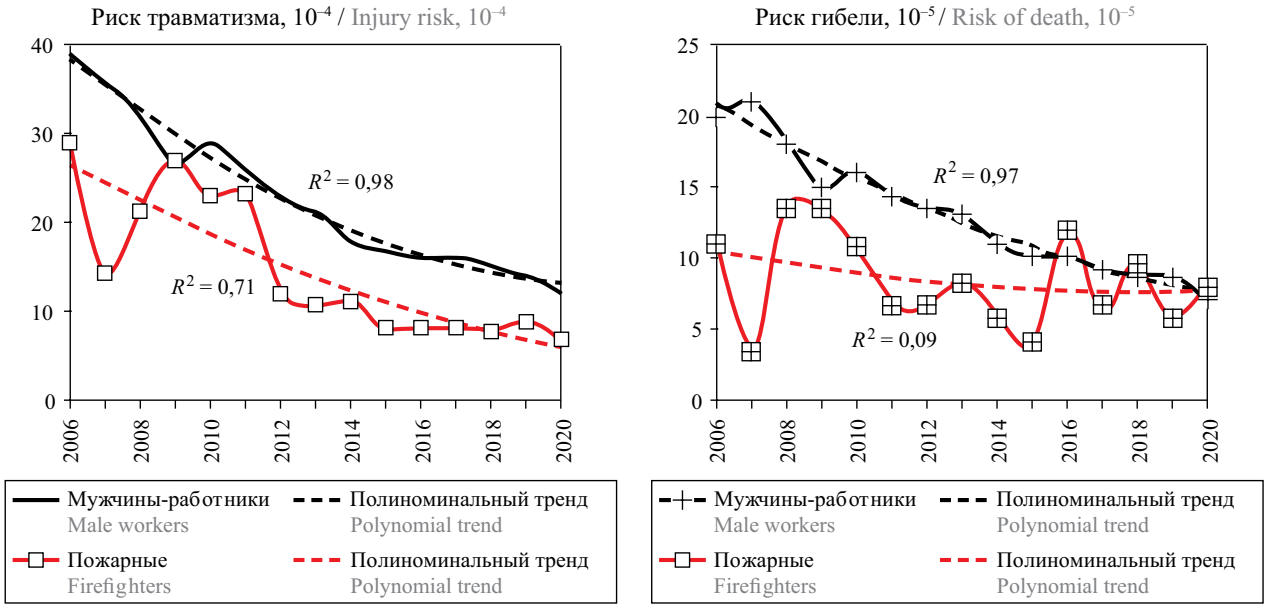


Рис. 1. Риски производственного травматизма (*a*) и гибели (*b*) личного состава ФПС МЧС России и мужчин-работников России

Fig. 1. Risks of occupational injuries (*a*) and death (*b*) of the personnel of the FFS of the EMERCOM of Russia and male workers of Russia

Методы исследования

Данные по производственному травматизму и гибели личного состава ФПС МЧС России взяли из монографии [15], работающих в России — из сайта Росстата[1].

Риски производственного травматизма рассчитали на 10 тыс. (10^{-4}) личного состава (сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) ФПС МЧС России за 15 лет с 2006 по 2020 г., риски гибели при исполнении служебных обязанностей — на 100 тыс. человек (10^{-5}). В связи с тем, что в ФПС МЧС России женщин около 1,5 %, сравнение рисков личного состава провели с показателями мужчин-работников России.

Качественные показатели рисков соотнесли с цветами светофора:

- оптимальный (зеленый цвет светофора) — средние значения в регионе более чем на 1/3 меньше средней величины риска по ФПС МЧС России;
- допустимый (желтый цвет) — средние значения в регионе отличаются не более чем на 1/3 от среднего показателя риска по МЧС России;
- повышенный (неприемлемый, красный цвет) — средние значения в регионе превышают больше чем на 1/3 среднюю величину риска по МЧС России.

В динамике выявили неоднородность данных и их значительные колебания в течение 15 лет. Чаще всего это касалось числа гибели пожарных. В отдельные годы наблюдали значительные отклонения от среднестатистических значений.

Для уменьшения вклада случайной составляющей, приводящей к существенным колебаниям, применили метод сглаживания временных рядов [21], который заключался в замене фактических значений на расчетные, характеризующиеся меньшей вариабельностью, а также сглаживание показателей травматизма и гибели с использованием методов скользящего среднего и экспоненциального сглаживания. Получили близкие результаты, при этом средние значения и среднеквадратичные отклонения сглаженных распределений существенно отличались от соответствующих параметров исходного распределения. В окончательном анализе для исключения возможного искажения результатов процедуру сглаживания не использовали [15, 18, 19]. В ряде случаев рассчитанные риски травматизма и гибели отличались от нормального распределения. В статье представили средние арифметические показатели и их ошибки ($M \pm m$). Конгруэнтность (согласованных) трендов изучили при помощи коэффициента корреляции Пирсона.

[1] Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru

Рис. 2. Картограмма рисков производственного травматизма личного состава ФПС МЧС России по федеральным округам России

Fig. 2. Cartogram of occupational injury risks of personnel of the FFS of the Emercom of Russia by federal districts of Russia

Региональные риски производственного травматизма и гибели личного состава ФПС МЧС России (2006–2020 гг.)
Regional risks of occupational injury and death of personnel of the FFS of the Emercom of Russia (2006–2020)

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Белгородская область Belgorod region	3,23 ± 1,55	6,47 ± 6,47
Брянская область Bryansk region	18,56 ± 5,05	6,87 ± 6,87
Владимирская область Vladimir region	8,04 ± 3,82	2,77 ± 2,77
Воронежская область Voronezh region	5,08 ± 1,47	2,54 ± 2,54
Ивановская область Ivanovo region	11,65 ± 2,11	33,99 ± 15,68
Калужская область Kaluga region	9,77 ± 2,00	6,74 ± 4,59
Костромская область Kostroma region	12,29 ± 3,41	5,85 ± 5,85
Курская область Kursk region	4,59 ± 1,42	5,74 ± 5,74
Липецкая область Lipetsk region	13,56 ± 3,49	0,0 ± 0,0
Московская область Moscow region	10,94 ± 2,51	14,78 ± 4,14
Орловская область Oryol region	12,54 ± 4,21	10,90 ± 7,43
Рязанская область Ryazan region	33,80 ± 19,56	0,0 ± 0,0
Смоленская область Smolensk region	13,15 ± 2,69	9,07 ± 6,18
Тамбовская область Tambov region	12,21 ± 3,47	21,55 ± 11,52
Тверская область Tver region	6,21 ± 2,06	8,47 ± 6,13
Тульская область Tula region	5,74 ± 1,00	10,43 ± 4,62
Ярославская область Yaroslavl region	16,51 ± 2,83	4,23 ± 4,23
Москва Moscow	14,63 ± 2,13	15,89 ± 5,40

Продолжение таблицы / Continue of the Table

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Центральный ФО Central Federal District	11,11 ± 0,90	10,62 ± 1,94
Республика Карелия Republic of Karelia	17,47 ± 3,99	10,92 ± 7,44
Республика Коми Komi Republic	8,89 ± 1,94	4,24 ± 4,24
Архангельская область Arhangelsk region	17,47 ± 5,48	0,0 ± 0,0
Ненецкий автономный округ Nenets Autonomous District	13,33 ± 9,09	0,0 ± 0,0
Вологодская область Vologda Region	17,43 ± 4,32	11,62 ± 11,62
Калининградская область Kaliningrad region	22,48 ± 4,63	11,24 ± 7,66
Ленинградская область Leningrad region	8,89 ± 1,43	8,09 ± 5,51
Мурманская область Murmansk region	20,81 ± 6,91	6,71 ± 6,71
Новгородская область Novgorod region	16,03 ± 2,99	7,29 ± 7,29
Псковская область Pskov region	9,72 ± 2,41	7,47 ± 7,47
Санкт-Петербург Saint Petersburg	10,05 ± 2,54	12,76 ± 3,95
Северо-Западный ФО Northwestern Federal District	13,69 ± 1,65	9,10 ± 2,44
Республика Адыгея Republic of Adygea	22,99 ± 8,19	11,49 ± 11,49
Республика Калмыкия Republic of Kalmykia	22,22 ± 8,33	6,01 ± 6,01
Краснодарский край Krasnodar region	8,44 ± 1,36	2,45 ± 1,67
Астраханская область Astrakhan region	8,97 ± 1,85	4,27 ± 4,27

Продолжение таблицы / Continue of the Table

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Волгоградская область Volgograd region	17,48 ± 3,43	9,32 ± 5,36
Ростовская область Rostov region	17,32 ± 2,94	8,66 ± 4,12
Республика Крым Republic of Crimea	16,77 ± 4,78	13,97 ± 9,54
Севастополь Sevastopol	9,70 ± 3,64	32,32 ± 22,08
Южный ФО Southern Federal District	13,18 ± 1,48	6,43 ± 1,83
Республика Дагестан Republic of Dagestan	40,98 ± 8,66	42,25 ± 20,20
Республика Ингушетия Republic of Ingushetia	22,95 ± 4,61	21,86 ± 12,56
Чеченская Республика Chechen Republic	6,73 ± 1,44	3,74 ± 3,74
Кабардино-Балкарская Республика Kabardino-Balkarian Republic	19,39 ± 6,75	0,0 ± 0,0
Карачаево-Черкесская Республика Karachay-Cherkess Republic	28,22 ± 5,59	0,0 ± 0,0
Республика Северная Осетия–Алания Republic of North Ossetia–Alania	31,43 ± 15,90	26,20 ± 17,85
Ставропольский край Stavropol region	22,04 ± 4,93	6,78 ± 4,62
Северо-Кавказский ФО North Caucasian Federal District	23,65 ± 2,78	14,49 ± 4,10
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	9,24 ± 1,53	9,40 ± 5,02
Республика Марий Эл Mari El Republic	19,83 ± 8,25	5,09 ± 5,09

Продолжение таблицы / Continue of the Table

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Республика Мордовия Republic of Mordovia	12,36 ± 4,99	4,76 ± 4,76
Республика Татарстан Republic of Tatarstan	7,80 ± 5,01	6,00 ± 2,27
Удмуртская Республика Udmurt Republic	16,71 ± 7,01	0,0 ± 0,0
Чувашская Республика Chuvash Republic	23,73 ± 10,03	10,79 ± 7,35
Пермский край Perm region	5,48 ± 1,38	3,32 ± 2,27
Кировская область Kirov region	26,03 ± 12,27	13,35 ± 7,84
Нижегородская область Nizhniy Novgorod region	7,68 ± 2,89	8,27 ± 5,70
Оренбургская область Orenburg region	14,05 ± 5,50	21,21 ± 8,56
Пензенская область Penza region	15,09 ± 7,38	0,0 ± 0,0
Самарская область Samara Region	22,20 ± 9,87	2,24 ± 2,24
Саратовская область Saratov region	10,08 ± 3,15	7,91 ± 6,12
Ульяновская область Ulyanovsk region	8,46 ± 2,45	6,51 ± 4,44
Приволжский ФО Privolzhsky Federal District	12,41 ± 3,41	7,38 ± 1,42
Курганская область Kurgan region	15,40 ± 5,04	7,33 ± 5,00
Свердловская область Sverdlovsk region	19,73 ± 6,40	5,45 ± 2,59
Тюменская область Tyumen region	18,69 ± 8,16	5,90 ± 4,27
Ханты-Мансийский автономный округ Khanty-Mansi Autonomous District	16,09 ± 3,53	24,75 ± 11,42
Ямало-Ненецкий автономный округ Yamalo-Nenets Autonomous District	34,35 ± 13,04	0,0 ± 0,0

Продолжение таблицы / Continue of the Table

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Челябинская область Chelyabinsk region	9,40 ± 1,77	2,51 ± 1,71
Уральский ФО Ural Federal District	17,55 ± 3,92	7,63 ± 2,69
Республика Алтай Altai Republic	20,06 ± 5,47	0,0 ± 0,0
Республика Тыва Tyva Republic	15,12 ± 4,37	6,87 ± 6,87
Республика Хакасия Republic of Khakassia	18,23 ± 4,86	0,0 ± 0,0
Алтайский край Altai region	9,16 ± 2,58	4,74 ± 3,43
Красноярский край Krasnoyarsk region	10,49 ± 1,83	0,0 ± 0,0
Иркутская область Irkutsk region	7,36 ± 2,06	8,66 ± 3,54
Кемеровская область Kemerovo region	5,63 ± 1,41	12,88 ± 6,18
Новосибирская область Novosibirsk region	7,08 ± 1,48	3,54 ± 2,41
Омская область Omsk region	9,79 ± 1,58	5,06 ± 2,71
Томская область Tomsk region	8,37 ± 1,52	0,0 ± 0,0
Сибирский ФО Siberian Federal District	9,06 ± 1,00	4,95 ± 1,22
Республика Бурятия Republic of Buryatia	64,79 ± 13,66	28,80 ± 19,62
Республика Саха–Якутия Republic of Sakha (Yakutia)	16,18 ± 4,03	21,57 ± 9,56
Забайкальский край Transbaikal region	12,00 ± 2,03	4,00 ± 4,00
Камчатский край Kamchatka region	42,75 ± 20,14	0,0 ± 0,0
Приморский край Primorsky region	20,69 ± 4,36	6,09 ± 4,15
Хабаровский край Khabarovsk region	31,68 ± 6,33	13,77 ± 9,39
Амурская область Amur region	11,53 ± 2,27	6,40 ± 6,40

Окончание таблицы / End of the Table

Регион Region	Риск травматизма, 10^{-4} Injury risk, 10^{-4}	Риск гибели, 10^{-5} Risk of death, 10^{-5}
Магаданская область Magadan region	10,60 ± 2,63	0,0 ± 0,0
Сахалинская область Sakhalin region	25,96 ± 2,99	0,0 ± 0,0
Еврейская автономная область Jewish autonomous region	40,62 ± 10,42	0,0 ± 0,0
Чукотский автономный округ Chukotka autonomous district	17,95 ± 6,46	0,0 ± 0,0
Дальневосточный ФО Far Eastern Federal District	22,57 ± 2,83	7,81 ± 1,70
Российская Федерация Russian Federation	14,66 ± 2,01	8,53 ± 0,83

Результаты исследования и их обсуждение

Производственный травматизм. Расчет качественных градаций риска травматизма показал, что оптимальный риск был при показателях менее $9{,}77 \cdot 10^{-4}$, допустимый — $(9{,}77–19{,}55) \cdot 10^{-4}$, повышенный — более $19{,}55 \cdot 10^{-4}$. Исходя из принятых градаций, риск производственного травматизма у категорий личного состава ФПС МЧС России являлся допустимым.

На рис. 2 показаны риски травматизма по федеральным округам (ФО) России. Оказалось, что оптимальный риск травматизма был в Сибирском ФО $(9{,}06 \pm 1{,}00) \cdot 10^{-4}$ травм/(человек · год), высокий — в Дальневосточном ФО $(22{,}57 \pm 2{,}83) \cdot 10^{-4}$ и Северо-Кавказском ФО — $(23{,}65 \pm 2{,}78) \cdot 10^{-4}$, в остальных округах он соответствовал допустимой градации.

В таблице сведены риски производственного травматизма и гибели по регионам России. Оптимальный риск травматизма пожарных наблюдался в 24 регионах, повышенный — в 23, в остальных регионах — средний.

Гибель на производстве. Расчет качественных градаций риска гибели показал, что оптимальный риск был при показателях менее $5{,}69 \cdot 10^{-5}$, допустимый — $(5{,}69–11{,}37) \cdot 10^{-5}$, повышенный — более $11{,}37 \cdot 10^{-5}$. Исходя их принятых градаций, оптимальный риск гибели был у профилактического персонала, у других категорий личного состава он соотносился с допустимым риском.

Рис. 3. Картограмма рисков гибели личного состава ФПС МЧС России по федеральным округам России
Fig. 3. Cartogram of dearth risks of personnel of the FFS of the Emercom of Russia by federal districts of Russia

На рис. 3 показаны риски гибели при выполнении служебных обязанностей пожарных по ФО России. Оказалось, что оптимальный риск гибели был в Сибирском ФО $(4{,}95 \pm 1{,}22) \cdot 10^{-5}$ смертей/(человек · год), высокий — в Северо-Кавказском ФО — $(14{,}49 \pm 4{,}10) \cdot 10^{-5}$, в остальных округах он соответствовал допустимой градации.

Оказалось также, что оптимальный риск гибели пожарных был в 35 регионах России, повышенный — в 19, в остальных регионах — допустимый (см. таблицу).

Выводы

1. Среднегодовой риск производственного травматизма личного состава (сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) Федеральной противопожарной службы МЧС России за 15 лет (2006–2020 гг.) составил $(14{,}66 \pm 2{,}01) \cdot 10^{-4}$ травм/(человек · год). Оптимальный риск травматизма был в Сибирском федеральном округе и в 24 регионах России, повышенный — в Дальневосточном, Северо-Кавказском федеральных округах и в 23 регионах, допустимый — в остальных федеральных округах и регионах.

2. Среднегодовой риск гибели при выполнении служебных обязанностей личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России за 15 лет (2006–2020 гг.) составил $(8{,}53 \pm 1{,}00) \cdot 10^{-5}$ смертей/(человек · год). Оптимальный риск гибели был в Сибирском федеральном округе и в 35 регионах России, повышенный — в Северо-Кавказском федеральном округе и в 19 регионах, допустимый — в остальных федеральных округах и регионах.

3. К сожалению, полностью исключить травматизм нельзя, его можно только минимизировать. Для этих целей рассчитаны качественные показатели рисков. Необходим учет и анализ всех случаев производственных травм с участием руководителей, специалистов охраны труда, инженеров, пожарных и врачей для выработки мероприятий по их профилактике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gammarano R.* Quick guide on sources and uses of statistics on occupational safety and health // International Labour Organization. Geneva, 2020. 39 p.
2. *Takala J., Hämäläinen P., Nenonen N., Takahashi K., Chimed-Ochir O., Rantanen J.* Comparative analysis of the burden of injury and illness at work in selected countries and regions // Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2017. Vol. 23. Issue 1–2. Pp. 6–31.

3. *Takala J., Hämäläinen P., Saarela K.L., Yun L.Y., Manickam K., Jin T.W. et al.* Global Estimates of the Burden of Injury and Illness at Work in 2012 // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2014. Vol. 11. Issue 5. Pp. 326–337. DOI: 10.1080/15459624.2013.863131
4. *Hämäläinen P., Takala J., Boon Kiat T.* Global estimates of occupational accidents and work-related illnesses 2017. Singapore : Workplace Safety and Health Institute, 2017. 20 p.
5. Safety and healthat the heart of the future of work: Building on 100 years of experience. Geneva : International Labour Organization, 2019. 82 p. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_687610.pdf
6. *Бухтияров И.В., Бобров А.Ф., Степанян И.В., Еремин А.Л., Курьеров Н.Н., Лосик Т.К. и др.* Методы оценки профессионального риска и их информационное обеспечение // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 12. С. 1327–1330. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-12-1327-1330
7. *Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Тихонова Г.И., Чуранова А.Н.* Производственный травматизм как критерий профессионального риска // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5 (164). С. 140–149. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32236999
8. *Долбик-Воробей Т.А., Чурилова Э.Ю.* Производственный травматизм в России (статистический анализ) // Финансовый бизнес. 2021. № 12 (222). С. 24–30.
9. *Мешков Н.А., Бухтияров И.В., Вальцева Е.А.* Оценка факторов риска профессиональной деятельности и состояние здоровья сотрудников противопожарной службы // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 10. С. 658–673. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-10-658-673
10. *Hong O., Chin D.L., Phelps S., Vogel S.* Occupational injuries, duty status, and factors associated with injuries among firefighters // Workplace Health Safety. 2012. Vol. 60. Issue 12. Pp. 517–523. DOI: 10.1177/216507991206001203
11. *Phelps S.M., Drew-Nord D.C., Neitzel R.L., Wallhagen M.I., Bates M.N., Hong O.S.* Characteristics and predictors of occupational injury among career firefighters // Workplace Health Safety. 2018. Vol. 66. Issue 6. Pp. 291–301. DOI: 10.1177/2165079917740595
12. *Szubert Z., Sobala W.* Work-related injuries among firefighters: sites and circumstances of their occurrence // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2002. Vol. 15. Issue 1. Pp. 49–55.
13. *Orr R., Simas V., Canetti E., Schram B.* A profile of injuries sustained by firefighters: A critical review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. Issue 2. P. 3931. DOI: 10.3390/ijerph16203931
14. *Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P.* World of Fire Statistics Statistics : Report // Center of Fire Statistics of CTIF. 2016–2021. URL: http://www.ctif.org
15. *Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Панкратов Н.А., Ветошкин А.А., Локтионов П.В.* Анализ производственного травматизма и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.) : монография. СПб. : Измайловский, 2022. 138 с.
16. *Kahn S.A., Leonard C., Lee Y.G., Boatwright R., Flamm T., Woods J.* A pilot survey of Southeastern firefighters: Safety practices, use of protective gear, and injury // Burns. 2020. Vol. 46. Issue 2. Pp. 298–302. DOI: 10.1016/j.burns.2019.03.012
17. *Marsh S.M., Gwilliam M., Konda S., Tiesman H., Fahy R.* Nonfatal Injuries to Firefighters Treated in U.S. Emergency Departments, 2003–2014 // American Journal of Preventive Medicine. 2018. Vol. 55. Issue 3. Pp. 353–360. DOI: 10.1016/j.amepre.2018.04.051
18. *Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Панкратов Н.А., Ветошкин А.А., Локтионов П.В.* Производственный травматизм у категорий личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020) // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2022. № 1. С. 41–51. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-41-51
19. *Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Гудзь Ю.В., Магданов Д.Ф., Панкратов Н.А.* Анализ рисков гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России в 2006–2020 гг. // Медицина катастроф. 2022. № 3. С. 17–23. DOI: 10.33266/2070-1004-2022-3
20. *Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Удавцова Е.Ю.* Региональные риски производственного травматизма и гибели личного состава оперативных подразделений МЧС России (2012–2021 гг.) // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4. С. 62–72. URL: https://elibrary.ru/aenwtp
21. *Маштаков В.А., Кондашов А.А., Бобринев Е.В., Шавырина Т.А., Удавцова Е.Ю.* Изучение динамики рисков гибели и травматизма личного состава Федеральной противопожарной службы с использованием сглаживания временных рядов // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 3. С. 4–11. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-3-4-11

REFERENCES

1. Gammarano R. *Quick guide on sources and uses of statistics on occupational safety and health*. International Labour Organization. Geneva, 2020; 39.
2. Takala J., Hämäläinen P., Nenonen N., Takahashi K., Chimed-Ochir O., Rantanen J. Comparative analysis of the burden of injury and illness at work in selected countries and regions. *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2017; 23(1-2):6-31.
3. Takala J., Hämäläinen P., Saarela K.L., Yun L.Y., Manickam K., Jin T.W. et al. Global Estimates of the Burden of Injury and Illness at Work in 2012. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2014; 11(5):326-337. DOI: 10.1080/15459624.2013.863131
4. Hämäläinen P., Takala J., Boon Kiat T. *Global Estimates of Occupational Accidents and Work-related Illnesses 2017*. Singapore, Workplace Safety and Health Institute, 2017; 20.
5. *Safety and healthat the heart of the future of work: Building on 100 years of experience*. Geneva, International Labour Organization, 2019; 82.
6. Bukhtiyarov I.V., Bobrov A.F., Denisov E.I., Eremin A.L., Kur'erov N.N., Losik T.K. et al. Occupational risk assessment methods and their information support. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2019; 98(12):1327-1330. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-12-1327-1330 (rus).
7. Bukhtiyarov I.V., Izmerov N.F., Tikhonova G.I., Churanova A.N. Occupational injuries as a criterion of professional risk. *Studies on Russian Economic Development*. 2017; 28(5):568-574. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32236999 (rus).
8. Dolbik-Vorobej T.A., Churilova E.Yu. Occupational injuries in Russia (statistical analysis). *Financial Business*. 2021; 12:24-30. (rus).
9. Meshkov N.A., Bukhtiyarov I.V., Valtseva E.A. Occupational risk factors and physical condition of firefighters. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2020; 60(10):658-673. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-10-658-673 (rus).
10. Hong O., Chin D.L., Phelps S., Vogel S. Occupational injuries, duty status, and factors associated with injuries among firefighters. *Workplace Health Safety*. 2012; 60(12):517-523. DOI: 10.1177/216507991206001203
11. Phelps S.M., Drew-Nord D.C., Neitzel R.L., Wallhagen M.I., Bates M.N., Hong O.S. Characteristics and predictors of occupational injury among career firefighters. *Workplace Health Safety*. 2018; 66(6):291-301. DOI: 10.1177/2165079917740595
12. Szubert Z., Sobala W. Work-related injuries among firefighters: sites and circumstances of their occurrence. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2002; 15(1):49-55.
13. Orr R., Simas V., Canetti E., Schram B. A profile of injuries sustained by firefighters: A critical review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(2):3931. DOI: 10.3390/ijerph16203931
14. Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P. *World of Fire Statistics* : *Report*. Center of Fire Statistics of CTIF. 2016–2021. URL: http://www.ctif.org
15. Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Pankratov H.A., Vetoshkin A.A., Loktionov P.V. *Analysis of occupational injury and mortality of personnel of the Federal Fire Service of the EMERCOM of Russia (2006–2020)* : *monograph.* St. Petersburg, Izmajlovskij Publ., 2022; 138 (rus).
16. Kahn S.A., Leonard C., Lee Y.G., Boatwright R., Flamm T., Woods J. A pilot survey of Southeastern firefighters: Safety practices, use of protective gear, and injury. *Burns*. 2020. 46(2):298-302. DOI: 10.1016/j.burns.2019.03.012
17. Marsh S.M., Gwilliam M., Konda S., Tiesman H., Fahy R. Nonfatal Injuries to Firefighters Treated in U.S. Emergency Departments, 2003–2014. *American Journal of Preventive Medicine*. 2018; 55(3):353-360. DOI: 10.1016/j.amepre.2018.04.051
18. Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Pankratov H.A., Vetoshkin A.A., Loktionov P.V. Occupational injuries in categories of personnel of Federal Fire Service of EMERCOM of Russia (2006–2020). *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations* 2022; (1):41-51. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-1-41-51 (rus).
19. Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Gudz Yu.V., Magdanov D.F., Pankratov H.A. Analysis of risks of fatalities among personnel of Federal firefighting service of EMERCOM of Russia in 2006–2020. *Disaster medicine*. 2022; 3:17-23. DOI: 10.33266/2070-1004-2022-17-23 (rus).
20. Evdokimov V.I., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Udavtsova E.Yu. Regional risks of occupational injuries and death of the personnel of operational units of the EMERCOM of Russia (2012–2021). *Problems of Technosphere Risk Management*. 2022; 4:62-72. URL: https://elibrary.ru/aenwtp (rus).
21. Mashtakov V.A., Kondashov A.A., Bobrinev E.V., Shavyrina T.A., Udavtsova E.Yu. Study of death and injury risks dynamics of the Federal fire-fighting service personnel using time series smoothing. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022; 3:4-11. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-3-4-11 (rus).

Поступила 13.03.2023, после доработки 28.03.2023;
принята к публикации 19.04.2023
Received March 13, 2023; Received in revised form March 28, 2023;
Accepted April 19, 2023

Информация об авторах

ЕВДОКИМОВ Владимир Иванович, д-р мед. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 4/2; ORCID: 0000-0002-0771-2102; e-mail: 9334616@mail.ru

БОБРИНЕВ Евгений Васильевич, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-8169-6297; e-mail: otdel_1_3@mail.ru

КОНДАШОВ Андрей Александрович, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-2730-1669; e-mail: akond2008@mail.ru

ГУДЗЬ Юрий Владимирович, д-р мед. наук, доцент, руководитель отдела травматологии и ортопедии, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 4/2; РИНЦ ID: 959485; ORCID: 0009-0000-2381-7484; e-mail: medicine@nrcerm.ru

УДАВЦОВА Елена Юрьевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-1343-0849; e-mail: otdel_1_3@mail.ru

Вклад авторов:

Евдокимов В.И. — *анализ результатов исследования; написание первого варианта статьи.*

Бобринев Е.В., Кондашов А.А. — *разработка методологии исследования; сбор первичных данных; анализ результатов исследования; редактирование окончательного варианта статьи.*

Гудзь Ю.В. — *изучение исследований по теме статьи; перевод реферата; транслитерация списка литературы.*

Удавцова Е.Ю. — *подготовка иллюстраций; редактирование окончательного варианта статьи.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vladimir I. EVDOKIMOV, Dr. Sci. (Med.), Professor, Chief Researcher, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, Emercom of Russia, Academica Lebedeva St., 4/2, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0771-2102; e-mail: 9334616@mail.ru

Evgeniy V. BOBRINEV, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8169-6297; e-mail: otdel_1_3@mail.ru

Andrey A. KONDASHOV, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2730-1669; e-mail: otdel_1_3@mail.ru

Yuriy V. GUDZ, Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of Traumatology and Orthopedics Department, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, Emercom of Russia, Academica Lebedeva St., 4/2, Sant Petersburg, 194044, Russian Federation; ID RISC: 959485; ORCID: 0009-0000-2381-7484; e-mail: medicine@nrcerm.ru

Elena Yu. UDAVTSOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1343-0849; e-mail: otdel_1_3@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladimir I. Evdokimov — *analysis of the results of the study; writing the first version of the article.*

Evgeniy V. Bobrinev, Andrey A. Kondashov — *development of research methodology; collection of primary data, analysis of research results; editing the final version of the article.*

Yuriy V. Gudz — *study of research on the topic of the article; translation of the abstract; transliteration of the list of references.*

Elena Yu. Udavtsova — *preparing illustrations; editing the final version of the article.*

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 93-98
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):93-98

УДК 614.84

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены статистические данные, отражающие состояние парка электромобилей в России. Проведено обобщение основных характеристик аккумуляторных блоков наиболее популярных моделей электромобилей в стране. Выполнен анализ существующих мер по обеспечению безопасной эксплуатации тяговых аккумуляторных батарей, снижающих опасность их механического повреждения и теплового разгона. Рассмотрены результаты отдельных зарубежных публикаций по моделированию горения и натурным огневым испытаниям электромобилей в помещениях и открытых пространствах. Даны рекомендации по разработке необходимых мероприятий по организации тушения пожаров с участием электромобилей.

Ключевые слова: гибридный автомобиль; тепловой поток; эвакуация; мощность; терморегуляция; защита; руководство пользователя; короткое замыкание

Для цитирования: *Харламенков А.С.* Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 93–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98

✉ *Харламенков Александр Сергеевич*, e-mail: h_a_s@live.ru

Modern extinguishing methods for lithium-ion batteries. Part 3

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

Statistical data reflecting the state of the electric vehicle fleet in Russia are presented. The main characteristics of the battery packs of the most popular models of electric cars in the country are summarized. An analysis of existing measures to ensure safe operation of traction batteries, reducing the risk of their mechanical damage and therma.runaway is performed. The results of some foreign publications on combustion modelling and full-scale fire tests of electric vehicles in rooms and open spaces are reviewed. Recommendations for the development of necessary measures to organize fire-fighting with the participation of electric cars are given.

Keywords: hybrid car; heat flow; evacuation; power; thermoregulation; protection; user manual; short circuit

For citation: Kharlamenkov A.S. Modern extinguishing methods for lithium-ion batteries. Part 3. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 32(3):93-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98 (rus.).

✉ *Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov*, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС

В рубрике «Вопрос–ответ» журналов № 1 и 2 за 2023 г. [1, 2] был проведен анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов (далее ЛИА) различного типа, возможные варианты тушения как отдельных ячеек, так и аккумуляторных модулей в составе систем накопления (хранения) электрической энергии. По результатам анализа было установлено, что основной причиной возникновения пожаров с участием ЛИА является механическое повреждение или наличие производственных дефектов отдельных ячеек аккумуляторной сборки, которые способствуют запуску пожароопасного процесса — теплового разгона (ТР). Помимо этого, ТР наблюдается в процессе подзарядки и активной разрядке ЛИА, в результате чего температура ячеек значительно возрастает, что также может привести к повреждению сепаратора ячейки и возникновению внутреннего короткого замыкания.

Обнаружение ТР на начальной стадии является одной из основных задач по предотвращению развития

© А.С. Харламенков, 2023

пожара с участием ЛИА. Для этой цели существует множество решений с применением внутренней и внешней систем защиты и мониторинга состояния ЛИА, снижающих последствия ТР как отдельных ячеек, так и аккумуляторных сборок (данные технические решения были рассмотрены в предыдущих статьях). Все меры, направленные на снижение последствий ТР ЛИА, можно разделить на превентивные и конструктивные, а при возникновении пожара — меры по его эффективному тушению [3]. Превентивные меры подразумевают разработку новых составов электролита с использованием различных добавок (антипиренов), снижающих пожарную опасность ЛИА. Конструктивные меры включают в себя применение предохранительных клапанов (разрывных мембран), терморезисторов (PTC), устройств прерывания тока (CID), электронной защиты в виде балансиров, плат PCB и BMS и т.д.

Наибольшие трудности возникают с тушением ЛИА, особенно в составе нескольких модулей, характерных для систем накопления электрической энергии, тяговых аккумуляторов электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей (PHEV).

Существует ли общепринятый порядок действий по тушению электромобилей, насколько опасны пожары с их участием и какие меры предпринимают производители для снижения риска воспламенения модулей и блоков с ЛИА?

ОТВЕТ

Перспективы развития парка электромобилей в Российской Федерации

По состоянию на январь 2023 г. в России насчитывается более 20,7 тыс. электромобилей[1]. С 2021 по 2023 гг. прирост составил 25,5 %, что составляет 4,2 тыс. машин. В январе-апреле 2023 г. было продано 2472 новых электромобиля, что в 2,5 раза больше, чем за аналогичный период 2022 г. При этом доля таких автомобилей не превышает 0,05 % от общего числа легковых автомобилей в стране.

Наибольшее количество электромобилей принадлежит маркам *Nissan, Tesla, Porsche, Audi, BMW* и *Mitsubishi*. На них приходится порядка 90 % всего электромобильного парка в нашей стране.

Процентное распределение электромобилей указанных фирм представлено на рис. 1.

По территориальному признаку наибольшее количество электромобилей находится в Центральном федеральном округе (5,8 тыс. шт.), на Дальнем Востоке (4,1 тыс. шт.), Сибири (3,8 тыс. шт.). На остальные федеральные округа, по отдельности, приходится менее 10 % (рис. 2).

Наибольшее скопление электромобилей приходится на крупные города, где есть соответствующая инфраструктура, обеспечивающая комфортное использование и возможность подзарядки данных автомобилей.

По статистике каждый третий владелец автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) готов пересесть на электромобиль. Также в начале марта 2023 г. в СМИ появилась информация о создании системы замены ДВС на электродвигатель, которая при массовом выпуске электродвигателей обойдется конечному пользователю от 650 тыс. до 1 млн руб. с учетом стоимости аккумуляторной батареи.

В конце апреля 2023 г. премьер-министр РФ утвердил 29 мер поддержки рынка электромобилей[2], которые включают в себя: реализацию программы субсидирования быстрых зарядных станций в 34 регионах страны; предоставление гражданам возможности применения медленных зарядных станций в подземных или наземных паркингах многоквартирных домов; размещение зарядных станций на АЗС; снижение стоимости полиса ОСАГО для владельцев электромобилей, эксплуатируемых в каршеринге и такси; увеличение финансовой поддержки программ стимулирования спроса на электромобили и др.

Реализация указанных мер будет способствовать росту потребительского спроса на электромобили, что приведет к увеличению количества эксплуатируемых литий-ионных

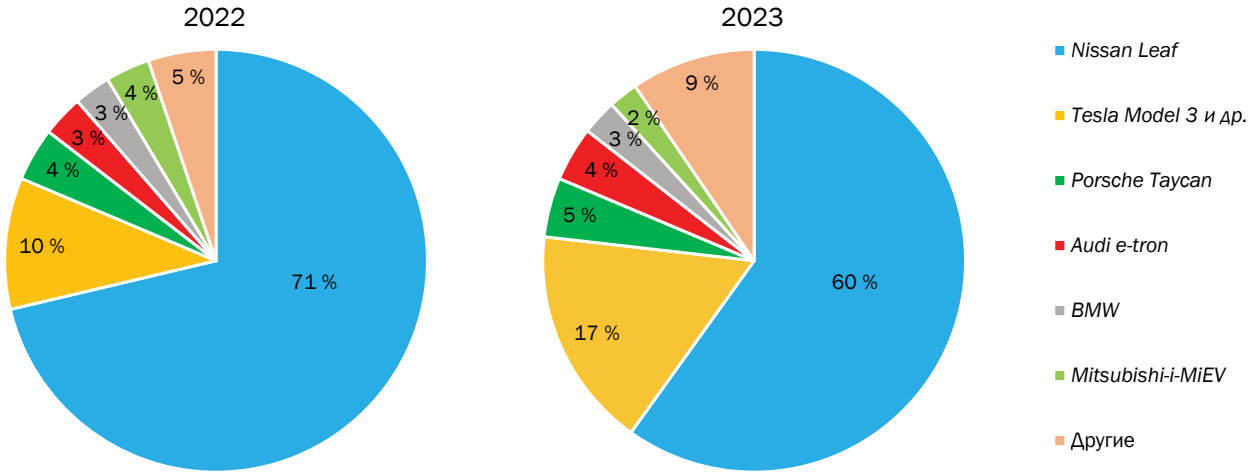


Рис. 1. Диаграммы распределения количества электромобилей в России за 2022 и 2023 гг.

[1] Информация аналитического агентства «Автостат». URL: https://www.autostat.ru

[2] Официальный сайт Правительства России. URL: http://government.ru/news/48386

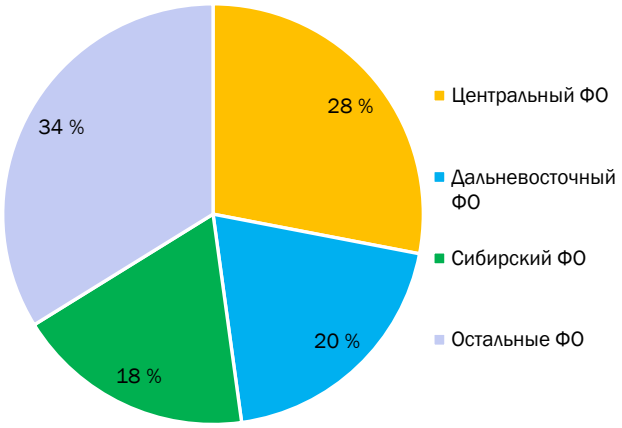


Рис. 2. Диаграмма распределения электромобилей по федеральным округам РФ в 2023 г.

батарей большой мощности и пожаров с их участием. Поэтому необходимо исследовать и внедрять в практику существующие технические разработки и организационные меры по предупреждению и тушению пожаров ЛИА.

Конструктивная защита батарейных блоков электромобилей

Для цели выбора эффективных способов тушения пожаров ЛИА необходимо выполнить оценку основных характеристик аккумуляторов самых распространенных в РФ моделей электромобилей (таблица).

Из таблицы видно, что NMC — наиболее распространенный тип аккумуляторов большинства моделей электромобилей, эксплуатируемых в России. Указанный тип ЛИА (наряду с NCA и LMO) обладает высокой степенью пожарной опасности, характеризующейся выбросом газа и воспламенением ячеек при их неисправности (перезаряд, короткое замыкание, механическое повреждение корпуса) [1].

Для снижения угрозы воспламенения блока ЛИА производители электромобилей предусматривают различные технические решения (пассивная защита — конструктивные меры). К ним можно отнести защиту от механического повреждения отдельных модулей и ячеек. Например, в модели *Nissan Leaf* между боковыми стенками корпуса аккумуляторного блока и модулями предусматриваются зазоры в 50 мм (рис. 3, *a*), называемые зоной смятия, позволяющие избежать повреждения модулей и ячеек в случае столкновения электромобиля. В нижней части также предусмотрены продольные и поперечные балки для повышения жесткости конструкции (рис. 3, *b*).

В *Tesla Model S* для снижения распространения ТР между соседними модулями предусмотрены небольшие перегородки (рис. 4, *a*). Кроме этого, для поддержания нормальной температуры аккумуляторной батареи встроено жидкостное охлаждение. Оно представляет собой охлажда-

a

b

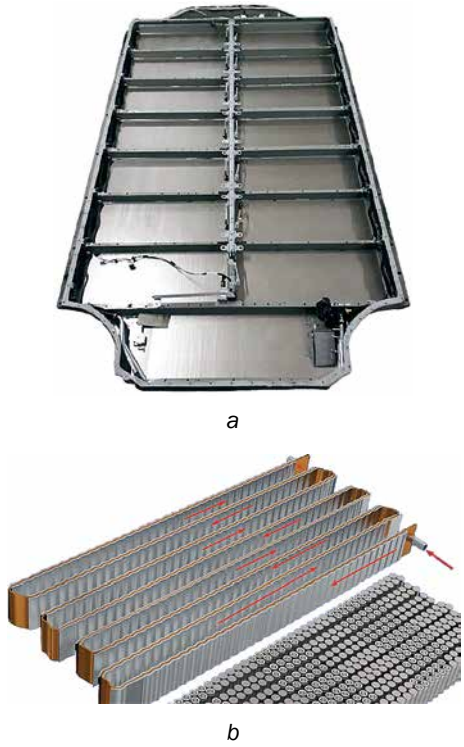
Рис. 3. Пассивные (конструктивные) меры защиты аккумуляторных блоков в *Nissan Leaf: a* — защита модулей с помощью бокового зазора; *b* — защита модулей с помощью усиления жесткости нижней крышки блока

Характеристики тяговых аккумуляторов электромобилей

Название модели	Номинальное напряжение, В	Энергия, кВт·ч	Масса батареи, кг	Плотность энергии, Вт·ч/кг	Форма ячейки в батарейном модуле	Химический состав ячейки
Nissan Leaf (2010)	360	24	225	110	Пакет-ячейка	LMO + LNO
Nissan Leaf (2017)	350	40	303	132	Пакет-ячейка	NMC
Tesla Model S и *X*	400	40–100	530	254	Цилиндрическая (тип 18 650)	NCA и NMC
Tesla Model 3 и *Y*	400	75–100	441	До 260	Цилиндрическая (тип 2170)	NMC и LFP*
Porsche Taycan	520–835	79,2–93,4	464–540	До 260	Пакет-ячейка	NMC**

* LFP батареи устанавливаются только в самых последних моделях электромобилей.
** NMC батареи отличаются по количеству никеля и марганца в зависимости от марки и серии автомобиля.

LMO — литий-марганцево-оксидные;
LNO — литий-никель-оксидные;
NCA — литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные;
NMC — литий-никель-марганец-кобальт-оксидные;
LFP — литий-железо-фосфатные



a

b

Рис. 4. Пассивные (конструктивные) меры защиты аккумуляторных блоков в *Tesla Model S: a* — защита модулей с помощью перегородок; *b* — охлаждающая трубка системы терморегуляции отдельных модулей

ющую трубку (запатентованная волнистая конструкция) с водно-гликолевым раствором, покрытую изоляционным материалом, проложенную внутри модуля между ячейками (рис. 4, *b*).

Представленные выше конструктивные меры защиты снижают вероятность повреждения модулей аккумуляторного блока, но полностью не могут исключить возникновение ТР в отдельных ячейках модуля.

Меры по тушению пожаров в руководствах пользователей электромобилей

Анализируя инструкции по тушению пожара отдельных производителей электромобилей, можно обнаружить, что некоторые компании рекомендуют на первоначальных этапах тушения выполнять резку или отключение проводников системы питания аккумуляторного блока от остальной электропроводки электромобиля. Обычно такое отключение может быть выполнено с помощью отсоединения специального выключателя, расположенного в салоне транспортного средства, реже — под капотом или в багажнике. Производители *Mitsubishi* и *Proterra* предлагают заливать горящий электромобиль водой с подачей ее в область размещения аккумуляторного блока, который у большинства моделей расположен в нижней части кузова под водительским и пассажирскими сидениями. *Subaru* и *Toyota* рекомендуют не заливать аккумулятор водой, а дать ему полностью сгореть. *Hyundai* и *Proterra* для мониторинга состояния поврежденного аккумуляторного блока при пожаре рекомендуют дополнительно пользоваться тепловизором[3].

Таким образом, можно констатировать, что в существующих руководствах пользователя и инструкциях производителей электромобилей отсутствует полноценная информация о том, как долго следует подавать воду на тушение горящей батареи, с какого момента можно прекращать проливку потушенного аккумулятора (например, при каких пороговых значениях температуры) и т.д. Ни один из производителей не дает конкретных инструкций о порядке действий по сведению к минимуму опасностей, связанных с воспламенением аккумуляторного блока электромобиля, включая риск повторного возгорания батареи.

В связи с этим необходима разработка единообразных руководств с алгоритмом действий собственников и пожарных подразделений при нарушении работы аккумуляторного блока и развитии пожароопасной ситуации с указанием специфики тушения отдельно взятой модели электромобиля. Такое руководство должно включать: порядок действий по тушению аккумуляторной батареи; способы по снижению риска возникновения ТР и риска повторного возгорания ЛИА; порядок действий по контролю безопасного состояния поврежденного аккумуляторного блока в процессе эвакуации и хранения электромобиля. Руководство должно разрабатываться при совместном участии производителей электромобилей, представителей научно-исследовательских институтов и подразделений пожарной охраны.

Математическое моделирование и натурные огневые испытания электромобилей

Проведение натурных экспериментов по изучению горения электромобилей достаточно дорогостоящий способ получения полезных сведений, поэтому требуется разработка математической модели развития пожара и ТР ЛИА различных форм и размеров.

В одном из исследований [4] был выполнен сравнительный анализ особенностей развития пожара при горении электромобилей. С помощью программного обеспечения CFD Fire Dynamic Simulator авторы смоделировали процесс горения двух электромобилей с тяговыми батареями на 16,5 и 23,5 кВт·ч и автомобиля с бензиновым двигателем, расположенных на подземной парковке. По результатам моделирования было установлено, что процессы нарастания температуры и снижения видимости практически совпадают по времени. Это указывает на отсутствие значительных отличий в параметрах расчета времени эвакуации людей при горении электромобиля. Следует отметить, что исследования проводились для электромобилей с маломощными аккумуляторными батареями, поэтому для более современных моделей

[3] Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles // Safety Report NTSB/SR-20/01/ National Transportation Safety Board. Washington, DC. 2020. 69 p. URL: https://www.ntsb.gov.

с блоками ЛИА на 40–100 кВт·ч, результаты сравнительного анализа могут заметно отличаться.

В другом исследовании [5] по горению гибридного автомобиля в закрытом пространстве с батареей на 13 кВт·ч (объем бензобака на 60 л) было установлено, что величина теплового потока на расстоянии 1 м по горизонтали не превысила допустимых значений (2,5 кВт/м^2 [6] — предельное значение для человеческой кожи[4]), в отличие от автомобилей с ДВС (ICEV), у которых эта величина в помещении объемом 3375 м^3 на расстоянии 1–1,5 м достигала 20 кВт/м^2. В то же время при горении ICEV в более просторном помещении величина теплового потока на расстоянии 5,5 м по горизонтали не превысила 2,5 кВт/м^2 [7]. В результате было установлено, что существенных отличий в параметрах тепловых потоков и безопасных расстояний при горении гибридного автомобиля и ICEV нет. Следовательно, при изучении процесса эвакуации людей при пожаре с участием PHEV можно руководствоваться имеющимися исследованиями пожаров ICEV.

На открытых стоянках автомобилей отмечается заметное снижение тепловых потоков, которые в пределах 1 м по горизонтали и вертикали при горении PHEV типа внедорожник достигали 1,151 кВт/м^2 и 0,6 кВт/м^2 соответственно [8]. Воспламенение аккумуляторного блока произошло только после 50 мин с момента начала ТР из-за внешнего короткого замыкания. В течение этого времени из корпуса батареи периодически происходил выброс накопленных газов. Предохранительный клапан аккумуляторного блока сработал через 6,5 мин после начала эксперимента. На 55-й мин произошло воспламенение газов под днищем автомобиля, а на 64-й пламя уже охватило салон.

Был проведен эксперимент [9] по распространению горения между электромобилем (NMC ячейки с суммарной энергией 38,1 кВт·ч) и гибридным автомобилем (аккумуляторный блок на 13 кВт·ч и 50 л бензина), установленных на расстоянии 0,6 м параллельно друг другу. В результате ТР ячейки одного из модулей электромобиля (процесс длился более 90 мин) последовало воспламенение выделяемых из батареи газов на 92-й мин. На 95-й мин зафиксировано резкое увеличение теплового потока (огонь перешел на соседний автомобиль (PHEV). К 98-й мин пламя охватило весь электромобиль, а на 111-й уже горел весь PHEV.

Представленные выше исследования указывают на длительность процесса ТР батарейного блока электромобиля и гибридного автомобиля в результате короткого замыкания, которое изначально приводит к периодическому выбросу накопившихся в блоке газов (до 1–1,5 ч без их воспламенения). Следует также указать на малый запас времени для эвакуации пассажиров из салона электромобиля (до 3 мин) после воспламенения батареи. Данная информация позволяет рассчитывать на заблаговременное обнаружение неисправности аккумуляторного блока и успешное тушение пожара на ранних стадиях. В случае ДТП и физического повреждения нескольких ячеек в модуле ТР и время до момента воспламенения блока может значительно сократиться.

Выводы

Отсутствие достаточных сведений о горении аккумуляторных блоков электромобилей требует дальнейших исследований и разработки концепции, которая должна включать в себя создание рабочих групп с участием производителей, научных институтов и подразделений пожарной охраны, которые позволят организовать проведение совместных работ по изучению пожаров на электромобилях и разработке эффективных способов их тушения [10]. Полученные результаты впоследствии должны быть включены в нормы и руководства по тушению пожаров. В указанных документах должны быть представлены сведения не только о порядке тушения пожара, но и о последующих действиях по эвакуации и хранению неисправного электромобиля.

В целях обучения боевых расчетов необходимо предусмотреть создание обучающих программ и полигонов по отработке действий по тушению пожаров с участием электромобилей. Исследование эффективных способов тушения пожаров с участием электромобилей будет представлено в следующем выпуске журнала.

[4] В Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности предельное значение теплового потока на высоте 1,7 м от уровня пола на путях эвакуации принимается 1,4 кВт/м^2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Харламенков А.С.* Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 89–96. URL: https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1199.
2. *Харламенков А.С.* Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 89–96. URL: https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1225

3. *Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Боков Г.В., Назаров А.А.* Проблемы пожарной безопасности режима теплового разгона в литиевых аккумуляторных батареях // Пожарная безопасность. 2022. № 4 (109). С. 73–79. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.109.4.008
4. *Dorsz A., Lewandowski M.* Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 1. P. 11. DOI: 10.3390/en15010011
5. *Okamoto K., Ichikawa T., Shimizu K., Honma M*. Thermal effect on surrounding combustibles in minivan passenger car fires // Fire Mater. 2018. Vol. 42. Issue 6. Pp. 583–592. DOI: 10.1002/fam.2512
6. *Purser D.A., McAllister J.L*. Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer. 2016. Pp. 2308–2428. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_63
7. *Hu Y., Zhou X., Cao J., Zhang L., Wu G., Yang L*. Interpretation of fire safety distances of a minivan passenger car by burning behaviors analysis // Fire Technol. 2020. Vol. 56. Pp. 1527–1553. DOI: 10.1007/s10694-019-00938-1
8. *Cui Y., Cong B., Liu J., Qiu M., Han X.* Characteristics and hazards of plug-in hybrid electric vehicle fires caused by lithium-ion battery packs with therma.runaway // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.878035
9. *Cui Y., Liu J., Cong B., Han X., Yin S.* Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 166. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.psep.2022.08.055
10. *Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovsky I.A*. The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 867. Issue 1. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092

Материал поступил в редакцию 15.05.2023
Received May 15, 2023

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

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 непереводимых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводимый 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 (Aimsand Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, 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. Использованные 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, сносок и примечаний;
- для рисунка: подрисуночной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристатейные 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 % об 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 (пристатейные 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, предоставившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!