

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ
ВЗРЫВНЫХ РЕЖИМОВ
ИСПАРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО
ПРИРОДНОГО ГАЗА





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 А.Г.**

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

Тел./факс: +7 (495) 287-49-14
доб. 14-23

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

Перепечатка материалов журнала
«Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion
Safety» только по согласованию с редакцией.
При цитировании ссылка на 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 24.02.2023.

Выход в свет 28.02.2023.

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.pxhere.com

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, Ньютаунбери, Велико-
британия)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Холщевников В.В., д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик
ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (Академия
Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

I Международная научно-практическая конференция
«Огнезащита материалов и конструкций» SPBPU FPM-2023,
18–20 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург, Россия

5

I International Scientific and Practical Conference "Fire
Protection of Materials and Structures" SPBPU FPM-2023,
April 18–20, 2023, St. Petersburg, Russia

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.С. БАРАНОВСКИЙ
Защита маломобильных групп населения при пожаре
в рамках требований действующих нормативных документов.
Необходимость или избыточность?

9

A.S. BARANOVSKY
Protection of mobility impaired persons
in case of fire pursuant to current regulations.
Is it necessary or redundant?

А.В. ПЕХОТИКОВ, А.А. АБАШКИН,
А.В. ГОМОЗОВ, А.В. ГОЛКИН
Современные требования по противопожарной защите
многоквартирных жилых зданий с применением конструкций
из перекрестноклееной древесины

28

A.V. PEKHOTIKOV, A.A. ABASHKIN,
A.V. GOMOZOV, A.V. GOLKIN
Modern requirements for fire protection of multi-apartment
residential buildings having structures made of cross-
laminated timber

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

С.В. ПУЗАЧ, Д.В. БАЧУРИН, Р.Г. АКПЕРОВ,
О.Б. БОЛДРУШКИЕВ, А.А. БАЛАЕВ
Образование токсичных газов при горении мягких игрушек
в многофункциональных торгово-развлекательных
комплексах

41

S.V. PUZACH, D.V. BACHURIN, R.G. AKPEROV,
O.B. BOLDRUSHKIEV, A.A. BALAEV
Generation of toxic gases during combustion
of stuffed toys in multifunction
shopping malls

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Взрывоопасность взвесей сухой молочной сыворотки

51

N.L. POLETAEV
Explosion hazard of whey powder mixed with air

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Н.Н. БРУШЛИНСКИЙ, С.В. СОКОЛОВ,
М.П. ГРИГОРЬЕВА, П. ВАГНЕР
Моделирование в области обеспечения
пожарной безопасности (обзор)

57

N.N. BRUSLINSKIY, S.V. SOKOLOV,
M.P. GRIGORIEVA, P. WAGNER
Modeling in the field
of fire safety (review)

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Е.А. АРТЕМЬЕВ
Оценка сходимости результатов экспериментальных
исследований огнестойкости сжатых железобетонных
элементов с повышенным процентом армирования
с численными расчетами

69

D.A. KOROLCHENKO, E.A. ARTEMYEV
Evaluating convergence between results of experimental
studies on fire resistance of compressed reinforced concrete
elements, having a higher percentage of reinforcement, and
results of numerical calculations

Ю.Н. ШЕБЕКО
Пожарная опасность взрывных режимов испарения
сжиженного природного газа

80

Yu.N. SHEBEKO
The fire hazard of explosive regimes of liquefied
natural gas evaporation

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Современные способы тушения
литий-ионных аккумуляторов. Часть 1

89

A.S. KHARLAMENKOV
Advanced methods of extinguishing lithium-ion
batteries. Part 1

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.



Защита маломобильных групп населения при пожаре

Стр. 9



Стр. 41

Образование токсичных газов в ТРК при горении мягких игрушек



Оценка сходимости расчетов огнестойкости ЖБ элементов

Стр. 69



Стр. 80

Пожарная опасность испарения сжиженного природного газа

Стр. 89



Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов

No. **1** VOL. **32**
2023

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



**FIRE AND
SAFETY**

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

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 A.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

Phone/Fax: +7 (495) 287-49-14
add. 14-23.

E-mail: info@fire-smi.ru

<https://www.fire-smi.ru>

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

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means
without the prior permission of the Publishers.
Reproducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.

Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.

Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 24.02.2023.

Date of publication 28.02.2023.

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 Engine-
ering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National
Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

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

V.V. Kholshchevnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member
of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for
Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (State Fire
Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

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

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

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

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

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

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

Российская академия наук
 Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
 и ликвидации последствий стихийных бедствий
 Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН
 Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России
 Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
 Всероссийский НИИ противопожарной обороны МЧС России
 Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России
 Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
 Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
 НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь
 Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан
 НИИ проблем горения Республики Казахстан
 Международная ассоциация специалистов пожарной, промышленной и экологической безопасности



I Международная научно-практическая конференция «ОГНЕЗАЩИТА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ» SPBPU FPM-2023

Место проведения конференции: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
 Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
 Адрес: 196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149

Даты проведения: 18–20 апреля 2023 г. **Официальный сайт конференции:** <http://fpm.spbstu.ru>

Информационная поддержка:



ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:
 Берлин А.А. Научный руководитель ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Академик РАН

Сопредседатели:
 Рудской А.И. Ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Академик РАН
 Гавкалюк Б.В. Начальник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, генерал-лейтенант внутренней службы, к. т. н., доцент

Заместитель председателя:

Сивенков А.Б. Профессор, Академия ГПС МЧС России, президент МАСППЭБ, д. т. н., профессор

Члены организационного комитета

Акулов А.Ю. Ведущий научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России, к. т. н., доцент

Алешков М.В. Заместитель начальника Академии ГПС МЧС России по научной работе, д. т. н., профессор

Ашуров Н.Р. Заведующий лабораторией НИЦ Химии и физики полимеров при Национальном университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека, д. т. н.

Асеева Р.М.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, д. х. н., профессор	Мухамедгалиев Б.А.	Профессор кафедры строительных материалов и химии, Ташкентский архитектурно-строительный институт, д. х. н.
Богданова В.В.	Профессор, НИИ ФХП БГУ, Белоруссия, д. х. н., профессор	Негматов С.С.	Научный руководитель ГУП «Фан ватаракиёт» Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, академик Академии наук Республики Узбекистан
Байшагиров Х.Ж.	Профессор кафедры физики и математики Кокшетауского государственного университета имени Ш. Уалиханова, Республика Казахстан, д. т. н., профессор	Новаков И.А.	Академик РАН, Президент Волгоградского государственного технического университета
Варфоломеев С.Д.	Научный руководитель ИБХФ РАН, член-корреспондент РАН	Петров В.В.	Профессор Южного федерального университета, д. т. н., профессор
Гарашенко А.Н.	Д. т. н., доцент, ЦНИИСМ, г. Хотьково	Покровская Е.Н.	Профессор, НИУ МГСУ, д. т. н., профессор
Голованов В.И.	Главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России, д. т. н., доцент	Пузач С.В.	Заведующий кафедрой инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России, д. т. н., профессор
Гордиенко Д.М.	Начальник ВНИИПО МЧС России, д. т. н.	Serdjuks D.O.	Department of Structural Engineering, Institute of Structural Engineering and Reconstruction, Riga Technical University, Professor, Dr. Sc. Eng. Latvia
Гравит М.В.	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, к. т. н., доцент	Серков Б.Б.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, д. т. н., профессор
Захматов В.Д.	Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России по научной работе, д. т. н., профессор	Смирнов А.С.	Первый заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, генерал-майор внутренней службы, д. т. н., профессор
Зубкова Н.С.	Заместитель генерального директора ЗАО ФПД «Энергоконтакт», д. х. н., профессор	Snegirev A.	Ghent University, Belgium, Professor, Dr. Sc., PhD, Meng, CEng, MInstP
Ивахнюк Г.К.	Профессор Санкт-Петербургского Государственного технологического института (технического университета), д. т. н., профессор	Танклевский Л.Т.	Заведующий базовой кафедрой «Пожарная безопасность» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, д. т. н., профессор
Казиев М.М.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, к. т. н., доцент	Шарипханов С.Д.	Начальник Академии гражданской защиты МЧС Республики Казахстан, д. т. н.
Карпов Д.А.	Заместитель начальника управления по связям с общественностью Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого	Шелоумов А.В.	Профессор, Санкт-Петербургская ЛТА, д. т. н., профессор
Клочков Ю.С.	Проректор по научно-организационной деятельности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, д. т. н., доцент	Шумай С.М.	Начальник НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь
Коробейничев О.П.	Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, д. ф.-м. н., профессор	Шутов Ф.А.	Профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, д. т. н., профессор
Константинова Н.И.	Главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России, д. т. н., профессор	ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ Председатель: Зыбина О.А. Заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России по научной работе, д. т. н., доцент	
Корольченко Д.А.	Заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, НИУ МГСУ, д. т. н.		
Леонович А.А.	Профессор Санкт-Петербургской лесотехнической академии, д. т. н., профессор	Члены программного комитета Альменбаев М.М. Начальник факультета Академии гражданской защиты МЧС Республики Казахстан, к. т. н. Андисов А.З. МАСПЭБ Андреев А.В. Директор Высшей школы технической безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, к. в. н., доцент	
Мансуров З.А.	Генеральный директор Института проблем горения Республики Казахстан, академик МАН ВШ, д. х. н., профессор		
Мнацаканов С.С.	Научный директор ООО «НПО «Иннотех», д. т. н., профессор		

Анохин Е.А.	Академия ГПС МЧС России, к. т. н.
Макишев Ж.К.	Академия гражданской защиты МЧС Республики Казахстан, к. т. н.
Рева О.В.	Профессор кафедры ПГиВ Университета гражданской защиты Республики Беларусь, к. х. н., доцент
Сахаров П.А.	Институт биохимической физики РАН
Федотов И.О.	Академия ГПС МЧС России
Халепа П.В.	МАСППЭБ
Шахабов М.М.	Академия ГПС МЧС России

Ученые секретари:

Кобелев А.А.	Академия ГПС МЧС России, к. т. н.
Устинов А.А.	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Технические секретари:

Мельдер Е.В.	Академия ГПС МЧС России
Гомазов Ф.А.	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- Разработка огнезащитных средств для материалов и конструкций, исследование их эффективности и механизма огнезащитного действия.
 - Эффективные технологии применения средств огнезащиты для защиты материалов и конструкций для объектов различных сфер жизнедеятельности.
 - Методы огневых испытаний и экспериментальная оценка параметров эффективности огнезащиты.
 - Расчетно-программные комплексы и инженерные подходы к оценке технических параметров для средств огнезащиты.
 - Вопросы оценки и обеспечения долговечности средств огнезащиты, методы и подходы.
 - Нормативно-техническое обеспечение применения средств огнезащиты для материалов и конструкций.
 - Сертификация и подтверждение соответствия качества огнезащитных средств, их идентификация.
- Программа конференции включает серию лекций, докладов, круглый стол, выставку ведущих производителей огнезащиты, подведение итогов заявленного оргкомитетом конкурса на лучшую работу молодых ученых.

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

26 декабря 2022 г.	Рассылка первого циркуляра. Начало регистрации участников на сайте Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
6 февраля 2023 г.	Рассылка второго циркуляра.
1 марта 2023 г.	Окончание регистрации участников на сайте Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
15 марта 2023 г.	Окончание приема тезисов докладов и копий платежного поручения и регистрации на мероприятия культурной программы.
18–20 апреля 2023 г.	Работа конференции.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

- Материалы представляются по электронной почте.
- Текст должен быть набран в редакторе Word for Windows (версия 6.0, русская редакция) шрифтом «Times New Roman» с высотой шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, без переносов, в одну колонку, нумерация страниц внизу посередине.
- Поля страницы: слева — 2 см, справа — 2 см, сверху и снизу — 2 см.
- Формулы набираются в MS Equation 2.0 размер шрифта эквивалентен 14 («Times New Roman»); формулы печатаются по центру, номер — у правого края страницы (нумеровать следует только формулы, упоминаемые в тексте).
- Рисунки необходимо выделять отдельным блоком для удобства переноса в тексте или вставлять из файла, выполненного в любом из общепринятых графических редакторов, под рисунком ставится: «Рис. 2.» и далее следуют пояснения; если в тексте не одна таблица, то их следует пронумеровать (сначала пишется: Таблица 2, на той же строке название таблицы полужирным и далее следует сама таблица); если в тексте одна таблица или один рисунок, то их нумеровать не следует; таблицы должны иметь «вертикальное» построение; в тексте ссылки на таблицы и рисунки делаются следующим образом: рис. 2, табл. 4, если всего один рисунок или одна таблица, то слово пишется целиком: таблица, рисунок.
- Список литературы должен содержать не более 5 источников.
- Объем тезисов от 3 до 5 страниц.

ПОРЯДОК ПЕЧАТИ

Название статьи по центру без переноса жирным шрифтом строчными буквами, через интервал — инициалы и фамилия автора строчными буквами, например: **А. А. Петров**, через интервал полное название учебного заведения (организации), далее через интервал текст, в конце статьи 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.

Тезисы докладов конференции будут распространены среди участников и гостей в начале мероприятия. Тезисы докладов, оформленные согласно правилам, направлять по адресу frm@spbstu.ru с названием файла «Доклад_ИвановДА».

Материалы конференции будут изданы в сборнике тезисов докладов конференции с индексацией в РИНЦ.

При подготовке докладов участниками конференции организационный комитет обращает внимание на информацию в разделе «Этика конференции» на официальном сайте конференции.

ОПЛАТА ОРГВЗНОСА ЗА УЧАСТИЕ В РАБОТЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Оплата оргвзноса за участие в работе конференции осуществляется на счет ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Банковские реквизиты ФГБОУ ВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГПС МЧС РОССИИ для перечисления организационных взносов участников конференции:

УФК по г. Санкт-Петербургу (ФГБОУ ВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГПС МЧС РОССИИ, л/с 20726Х95700)

БИК 014030106

р/сч 03214643000000017200

СЕВЕРО-ЗАПАДНОЕ ГУ БАНКА РОССИИ // УФК

по г. Санкт-Петербургу, г. Санкт-Петербург

к/с 40102810945370000005

ОКТМО 40373000

ИНН 7810271523

КПП 781001001

КБК 00000000000000000130

Оплату проводить с пометкой: оргвзнос за участие в работе конференции FPM-2023.

ВНИМАНИЕ!

Перед оплатой оргвзноса необходимо прислать на адрес электронной почты: ustinov@gefest-spb.ru (**Устинов Андрей Александрович** — ученый секретарь конференции, конт. тел. +7-981-799-78-98):

- для физических лиц — паспортные данные (ФИО, серия, номер, дата выдачи, кем выдан) с указанием размера оплаты оргвзноса;
- для юридических лиц — карточку предприятия с реквизитами с указанием размера оплаты оргвзноса.

С каждым из участников конференции будет заключен договор на оказание услуг по участию в работе конференции. После этого проводится оплата оргвзноса.

РАЗМЕР ОРГВЗНОСА ЗА УЧАСТИЕ В РАБОТЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Очное участие, публикация тезисов одного доклада от 3 до 5 страниц	7000 руб.
Заочное участие, публикация тезисов одного доклада от 3 до 5 страниц	4000 руб.
Студенты и аспиранты, публикация тезисов одного доклада от 3 до 5 страниц	2000 руб.
За каждую дополнительную страницу	500 руб.
Очное участие с докладом (без публикации), либо в качестве слушателя	2000 руб.

АДРЕСА ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

- **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 (1-й день конференции).

- **Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России**

Адрес: 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149 (2-й и 3-й дни конференции).

Проживание участников конференции будет организовано в гостиницах г. Санкт-Петербурга. Список гостиниц в качестве предложения для проживания:

- отель «Стоуни-Айленд», г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 12. Стоимость проживания за 2 ночи — от 6000 до 8000 руб. Веб-сайт: <https://stony-island.ru/>
- отель «Турист», г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 3. Стоимость проживания за 2 ночи — от 4600 до 10000 руб. Веб-сайт: <https://spbtourist.ru/>
- гостиница «Россия», г. Санкт-Петербург, пл. Чернышевского, 11. Стоимость проживания за 2 ночи — от 5160 до 12000 руб. Веб-сайт: <https://rossiya-hotel.ru/>

Информация о культурной программе и ее стоимости будет предоставлена на сайте конференции: <http://fpm.spbstu.ru>

Справки по телефонам и электронной почте:

В Москве: Кобелев Артем Александрович, +7-926-595-13-21; artemkobelev@gmail.com; fpm@spbstu.ru.

В Санкт-Петербурге: Устинов Андрей Александрович, +7-981-799-78-98; ustinov@gefest-spb.ru; fpm@spbstu.ru.

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

- 17 апреля** Заезд участников, размещение участников в гостиницах г. Санкт-Петербурга.
- 18 апреля** Регистрация участников, открытие конференции, пленарное заседание (место проведения: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).
- 19 апреля** Работа секций (место проведения: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России), круглый стол «Огнезащита материалов и конструкций. Проблемы и перспективы».
- 20 апреля** Работа секций (место проведения: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России), подведение итогов, заявленных оргкомитетом конкурса за лучший доклад молодыми учеными и специалистами. Официальное закрытие конференции. Отъезд участников конференции.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 1. С. 9–27
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(1):9-27

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.01.9-27>

Защита маломобильных групп населения при пожаре в рамках требований действующих нормативных документов. Необходимость или избыточность?

Алексей Сергеевич Барановский ✉

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. Нормативному регулированию обеспечения пожарной безопасности маломобильных групп населения (МГН) в последние годы уделяется большое внимание. Однако процесс формирования соответствующих требований и их применение имеют ряд проблем.

Цели и задачи. Целью статьи является исследование процесса формирования комплекса нормативных требований по защите маломобильных групп населения, начиная с возникновения первых требований норм в части доступности и обеспечения пожарной безопасности, а также рассмотрение и анализ требований действующих нормативных документов по пожарной безопасности и эффективности их применения в настоящее время.

Основная часть. Рассмотрены предпосылки возникновения требований по защите маломобильных групп населения от пожара. Описано нормативное развитие указанных требований в рамках строительных норм и правил, показаны их преимущества, выявлены противоречия и недостатки. Проанализированы действующие требования СП 1.13130.2020 в части обеспечения пожарной безопасности маломобильных групп населения с соответствующими комментариями разработчика и сделан вывод о целесообразности их дальнейшего совершенствования.

Выводы. Необходимость выполнения защиты МГН в рамках требований нормативных документов по пожарной безопасности является целесообразной. Однако указанные требования должны предусматривать сбалансированные и эффективные решения, позволяющие повысить уровень пожарной безопасности не только для МГН, а для всех людей на объекте, а также учитывать практику применения современных строительных решений, экономическую составляющую и иные аспекты существующих реалий.

Ключевые слова: пожарная безопасность; эвакуация; нормативные требования; пожаробезопасная зона; программа «Доступная среда»

Для цитирования: Барановский А.С. Защита маломобильных групп населения при пожаре в рамках требований действующих нормативных документов. Необходимость или избыточность? // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 9–27. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.9-27

✉ Барановский Алексей Сергеевич, e-mail: komnata110@yandex.ru

Protection of mobility impaired persons in case of fire pursuant to current regulations. Is it necessary or redundant?

Alexey S. Baranovsky ✉

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. Regulations, governing the fire safety of mobility impaired persons, have been in the spotlight over the last few years. However, problems arise in the process of developing and applying relevant requirements.

Goals and objectives. The purpose of the article is to study the process of developing a set of regulatory requirements focused on protection of mobility impaired population groups, including initial introduction of accessibility and fire safety requirements, analysis of current fire safety requirements in the regulatory documents, and effectiveness of their application at the present time.

The main body. The author analyzes preconditions for the introduction of requirements concerning the fire safety of impaired mobility groups. The process of updating these requirements in building codes and regulations is described; their strengths are demonstrated; contradictions and weaknesses are identified. Construction Regulations 1.13130.2020 are analyzed in terms of the fire safety of impaired mobility groups. Comments are made by a developer, and the conclusion is drawn about the need to revise these Construction Regulations.

Conclusions. There is a need to ensure the fire safety of impaired mobility groups within the framework of regulatory fire safety requirements. However, these requirements should develop into well-balanced and effective solutions aimed at improving the fire safety of both impaired mobility persons and everybody else inside a construction facility, and to take into account the practice of implementing advanced structural solutions, issues of economics, and other aspects of the present-day reality.

Keywords: fire safety; evacuation; regulatory requirements; fire safe area; Accessible Environment programme

For citation: Baranovsky A.S. Protection of mobility impaired persons in case of fire pursuant to current regulations. Is it necessary or redundant? *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):9-27. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.9-27 (rus).

✉ Alexey Sergeevich Baranovsky, e-mail: komnata110@yandex.ru

Введение. Актуальность вопроса

В последние годы большую актуальность приобрела тема доступности зданий, сооружений, а также различного рода услуг для категории граждан, относящихся к маломобильным группам населения (МГН). В значительной степени это связано с повышенным вниманием к указанной проблеме со стороны государства, поскольку вовлечение маломобильных граждан в активные процессы жизнедеятельности общества является важной социальной задачей, с учетом статистических данных о количестве людей, имеющих те или иные ограничения [1].

Так, в соответствии с данными статистики общее количество инвалидов по состоянию на 2021 г. составляет более 11,5 млн человек, а на 1 тыс. человек без ограничения мобильности приходится почти 80 граждан, относящихся к МГН.

Нормативные правовые акты, принятые в течение последних десятилетий, свидетельствуют о серьезных намерениях изменить негативную сторону сложившейся ситуации и обеспечить в части доступности равные права маломобильных граждан по сравнению с другими категориями населения на современном уровне [2]. К указанным нормативным правовым актам относятся:

- Федеральный закон от 24.11.1995 № 181-ФЗ «О социальной защите инвалидов в РФ» [3];
- Федеральный закон от 03.05.2012 № 46-ФЗ «О ратификации Конвенции о правах инвалидов» [4].

Кроме того, в 2011 г. была утверждена и в настоящее время реализуется государственная программа «Доступная среда» [5], одной из целей которой является формирование условий для обеспечения равного доступа инвалидов наравне с другими людьми к физическому окружению, транспорту, информации и связи, а также объектам и услугам, открытым или предоставляемым для населения.

Важной частью при этом является обеспечение пожарной безопасности рассматриваемой категории

населения, которое имеет свою специфику и, безусловно, является актуальной задачей.

Тем не менее процесс формирования комплекса нормативных требований по защите МГН от пожара проходил достаточно сложно, до сих пор вызывая определенные споры и даже некоторое неприятие в среде специалистов.

Таким образом, целью статьи является исследование указанного процесса, начиная с возникновения первых требований норм в части доступности и обеспечения пожарной безопасности, а также рассмотрение и анализ требований действующих нормативных документов по пожарной безопасности и эффективности их применения в настоящее время.

Возникновение и развитие нормативных требований по условиям доступности для МГН. Требования пожарной безопасности

Целенаправленная государственная политика по обеспечению условий доступности для МГН осуществляется уже сравнительно давно. Список нормативных правовых актов РФ, обеспечивающих и регламентирующих создание доступной среды, открывает Конституция Российской Федерации, которая в ст. 27 закрепляет право человека на свободу передвижения. При этом само по себе понятие «доступной среды» в законодательных актах впервые упоминается в Указе Президента РФ от 02.10.1992 № 1156 «О мерах по формированию доступной для инвалидов среды жизнедеятельности». Этот указ разработан в целях обеспечения доступности для инвалидов объектов *социальной и производственной* инфраструктуры, средств транспорта, связи и информатики и направлен на формирование доступной среды в традиционном понимании этого термина и решение связанных с этим задач, таких как:

- разработка специальных федеральных целевых программ;

- пересмотр действующих нормативных документов на проектирование, строительство и реконструкцию зданий и сооружений;
- экономическое стимулирование работ;
- информационная поддержка и т.д.

Далее в 1995 г. Государственной Думой был принят основополагающий закон в этой области — Федеральный закон от 24.11.1995 № 181-ФЗ «О социальной защите инвалидов в РФ» (ст. 14–16). Впоследствии также был принят ряд нормативных правовых актов, учитывающих положения данного закона и непосредственно относящихся к обеспечению доступности объектов маломобильным группам населения, в частности:

- Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ст. 2, 3, 7, 48, 51) [6];
- Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (ст. 7 ч. 5);
- Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (ст. 3, 8, 11, 12, 15, 17);
- КоАП РФ от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ст. 9.13, 9.14).

Положения указанных документов нашли свое отражение в Постановлении Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» в виде требования о наличии отдельного раздела проектной документации, а также в соответствующих нормативных правовых актах территориальных органов власти (Постановления и Распоряжения соответствующих правительств и т.д.).

Формирование указанных документов естественным образом привело к началу создания некоторой нормативной базы, касающейся вопросов доступности МГН, чему также способствовало наличие определенных исследований в указанной области [7, 8]. При этом необходимо отметить, что некоторые документы по данной проблеме уже были разработаны в период 1980-х гг., однако касались лишь отдельных вопросов возможности пребывания и доступности инвалидов, например [9], и были разрозненными.

Первым документом по вопросу доступности стала типовая инструкция [10], которую через некоторое время заменили ведомственные строительные нормы [11]. В свою очередь, указанные нормы и стали основой наиболее широко известного нормативного документа соответствующей проблематики — СНиП 35-01-2001 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» [12], редакции которых актуализируются и используются до настоящего времени [13, 14]. Кроме того, за несколько лет до выхода указанных СНиП Госстроем России был принят и *рекомендован* к применению достаточно интересный документ [15],

очень развернуто отражающий вопросы доступности для различных категорий зданий.

Нельзя не отметить, что важнейшим шагом в направлении развития темы доступности и повышенного внимания к указанной проблеме стало принятие Федерального закона от 03.05.2012 № 46-ФЗ «О ратификации Конвенции о правах инвалидов», которое и вызвало гораздо более широкую актуализацию нормативных документов и реформирование в этой сфере и создало дополнительные гарантии обеспечения, защиты и развития социальных и экономических прав инвалидов. Так, на основе ратификации Конвенции появился закон [16], затрагивающий многие сферы федерального законодательства, начиная с занятости населения и закона о культуре, а также который включает изменения в закон [3] в части обеспечения доступности.

Примерно в это же время была запущена большая государственная программа «Доступная среда», одной из главных задач которой является разработка и внедрение нормативно-правовых документов, созданных с учетом принципов формирования доступной среды для инвалидов.

Очевидно, что разработка документов по вопросам обеспечения доступности МГН неразрывно связана с вопросом обеспечения их безопасности на объектах различного назначения. С этой точки зрения наличие эффективных требований в рамках нормативных документов по пожарной безопасности в части обеспечения безопасности инвалидов является необходимым.

В свою очередь, развитие требований нормативных документов по *пожарной безопасности* в этой части шло очень медленно, фактически вплоть до ратификации Конвенции о правах инвалидов, и надо признать, что данной теме не уделялось существенного внимания.

Так, основополагающий документ в области пожарной безопасности системы нормативных документов 1980-х гг. (СНиП Часть II) «Противопожарные нормы» [17] не содержит требований или каких-либо упоминаний о необходимости обеспечения безопасности инвалидов.

В более современной его версии, являющейся основой существующих нормативных требований по пожарной безопасности (СНиП 21-01-97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений» [18]), несмотря на уже принятые нормативные правовые акты, о которых было сказано выше, указанные вопросы также освещены очень слабо. В документе присутствует лишь несколько поверхностных требований, при этом они противоречивы и явно недостаточны. В частности, к «эвакуации МГН» относится их «несамостоятельное перемеще-

ние» (пп. 6.2, 6.3 [18]), которое, как правило, в традиционном понимании относится к «спасению».

Кроме того, формально введено требование о необходимости предусматривать ширину путей эвакуации таким образом, чтобы в любом случае было возможно пронести носилки с лежащим на них человеком (п. 6.16, 6.27). При этом требуемые геометрические параметры носилок четко не оговорены.

В еще один важный строительный документ, касающийся всех общественных зданий и содержащий требования пожарной безопасности (СНиП 2.08.02–89* «Общественные здания и сооружения» [19]), в 1999 г. было внесено изменение № 3, которое представляло собой целый раздел, посвященный мероприятиям, связанным с МГН, и официально опирающийся на положения [15]. Однако преимущественно внимание в данном случае уделялось вопросам доступности, либо физической безопасности (отсутствие выступающих конструкций, скользких поверхностей и т.д.), вопросы пожарной безопасности не затрагивались. Кроме того, само понятие «маломобильных групп» было достаточно размыто. Сюда входили «лица преклонного возраста» и даже «временно нетрудоспособные».

Все вышесказанное свидетельствует, что, несмотря на достаточно серьезное развитие нормативных документов в части пожарной безопасности и наличие документов высокого уровня в части доступности, соответствующих противопожарных требований по защите МГН фактически не существовало.

Это вызывает удивление с учетом того, что, кроме обычных общественных зданий, для которых данный вопрос, возможно, менее значителен, существует достаточно много объектов социальной направленности, где защита данных категорий граждан, казалось бы, представляет собой первоочередную задачу (больницы, дома престарелых, интернаты различного профиля и т.д.). Несмотря на это, проектирование противопожарной защиты указанных объектов в целом осуществлялось «стандартно», почти ничем не отличаясь от иных общественных зданий, за исключением лишь некоторых более «жестких» требований. Такая ситуация на фоне неплохих данных статистики может объясняться только расчетом на добросовестную эксплуатацию, соответствующую подготовку и квалификацию персонала, а также на эффективный механизм контроля со стороны органов государственного пожарного надзора. Это предположение подтверждается наличием большого количества резонансных пожаров в подобных соцучреждениях в 2000-х гг., когда большинство из указанных объектов пришли в упадок, имели серьезные недостатки в ресурсах, персонале,

а контроль их пожарной безопасности был значительно снижен.

В то же время заслуживает внимания тот факт, что соответствующие исследования в области защиты МГН от пожара уже проводились и достигли определенных успехов, однако их результаты достаточно медленно внедрялись в нормативные документы. В частности, указанные работы проводились основоположниками изучения движения МГН при эвакуации в нашей стране — специалистами Академии государственной противопожарной службы В.В. Холщевниковым, Д.А. Самошиным и их последователями [20–26].

При этом нельзя не отметить, что среди многочисленных пособий к СНиП и иных руководящих документов, ориентированных на проектирование зданий конкретного функционального назначения, все же встречались попытки учета подобных вопросов, однако они существовали вне всякой системы, не имели четкого нормирования и соответствующего обоснования. Так, московские городские строительные нормы по проектированию домов-интернатов для инвалидов и престарелых [27] и соответствующее пособие к ним кроме требований, ограничивающих размещение МГН по этажам, регламентирует необходимость устройства специальных открытых лоджий для возможности «отстоя людей при пожаре» (п. 5.42), что в настоящее время является одним из типов пожаробезопасной зоны. Кроме того, рекомендуется применение специальных спасательных устройств — тобогганов (рис. 1). При этом отсутствует какая-либо конкретика по их количеству, техническим характеристикам и иным параметрам и, очевидно, что сама по себе эффективность применения таких устройств в данном случае является очень спорной.

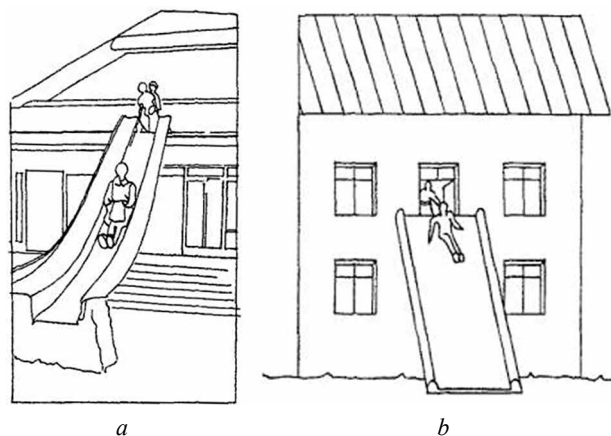


Рис. 1. Специальные устройства (тобогганы), используемые для спасения людей при пожаре: *a* — стационарный; *b* — приставной

Fig. 1. Special devices (toboggans) used to rescue people in case of fire: *a* — stationary; *b* — removable

Что касается иных общественных, а тем более жилых зданий, то, как видно из приведенного выше анализа, необходимость защиты МГН при пожаре не регламентировалась вовсе, следовательно, никаких мероприятий при проектировании и строительстве для этого не предусматривалось.

Переходный период. СНиП 35-01–2001

Ситуация принципиально изменилась с выходом СНиП «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» [12] и соответствующих Сводов правил 35-го комплекса, разработанных в его развитие и заменивших собой [11]. В указанный документ, кроме требований по доступности, были включены положения, касающиеся обеспечения пожарной безопасности МГН, в том числе по результатам вышеупомянутых исследований [20–26]. Сюда вошли требования к:

- размещению;
- путям эвакуации;
- пожаробезопасным зонам, предназначенным для пребывания МГН при пожаре;
- лифтам для спасения МГН.

В документе также было опубликовано дополнение к методике расчета, изложенной в Приложении 2 к ГОСТ 12.1.004 [28], учитывающее движение инвалидов в процессе эвакуации. Кроме того, впервые была разработана классификация групп мобильности.

В качестве важнейших моментов следует отметить, во-первых, приобретение требованиями документа статуса строительных норм и правил, что само по себе выводило рассмотрение проблематики доступности и безопасности инвалидов при строительстве зданий на новый уровень.

Во-вторых, область применения документа, которая, с одной стороны, включала в себя общественные, жилые и промышленные здания и декларировала необходимость создания равных условий для МГН и обычных граждан, а, с другой стороны, допускала возможность полного отсутствия доступа МГН, основываясь лишь на данных задания на проектирование (п. 1.1 [12]).

Последняя особенность на первый взгляд выглядит довольно парадоксально, однако имеет под собой основания, так как все-таки не полностью все объекты строительства имеют необходимость доступа МГН (например, промышленные предприятия, ряд офисных зданий и т.д.). Кроме того, предполагалось, что задание на проектирование должно учитывать требования федерального законодательства [3], а значит предписывать в большинстве случаев возможность доступа МГН на объекты при необходимом выполнении требований СНиП 35-01–2001.

Тем не менее на практике все выглядело совершенно иначе. А именно: зачастую нежелание заказчиков строительства выделять дополнительные средства на мероприятия по доступности отражалось в задании на проектирование, которое не предполагало присутствие МГН на объекте в том или ином виде. Это автоматически приводило к отсутствию необходимости выполнения требований СНиП 35-01–2001, что косвенно допускалось на тот момент отсутствием четких требований к наличию соответствующего раздела проектной документации.

В данном случае выполнения требований пожарной безопасности, изложенных в документе, как правило, также игнорировалось, что, главным образом, определялось существенными недостатками документа в этой части, начиная с неудачной системы классификации МГН (табл. 1) и заканчивая нечеткостью и отсутствием некоторых необходимых требований, а в ряде случаев их излишней жесткостью.

В частности, очевидно, что разнообразие группы мобильности М2 (инвалиды по старости + инвалиды на протезах + слабовидящие + люди с психическими отклонениями) не позволяет говорить об адекватности значений параметров, которые описывают характеристики их движения, или иных требований, предъявляемых к данной группе. Логика образования всей классификации, конечно, предельно ясна — это различные группы людей с разной степенью снижения мобильности, объединенные общим признаком наличия *инвалидности*. Однако в ней совершенно отсутствуют граждане, которые этим признаком не обладают, являясь при этом маломобильными, например временно передвигающиеся при помощи вспомогательных средств (наличие травмы и т.д.). Данная классификация не учитывает и другие группы людей, являющихся маломобильными в соответствии с определением самого документа¹.

Примером нечеткости могут служить требования о «минимально возможных» расстояниях до эвакуационных выходов или необходимость размещения пожаробезопасных зон «вблизи вертикальных коммуникаций» (пп. 3.41, 3.47).

¹ **Маломобильные группы населения (МГН):** люди, испытывающие затруднения при самостоятельном передвижении, получении услуги, необходимой информации или при ориентировании в пространстве. К маломобильным группам населения здесь относятся: инвалиды, люди с временным нарушением здоровья, беременные женщины, люди преклонного возраста, люди с детскими колясками и т.п. (п. Б.18, Приложение Б, СНиП 31-05–2001).

Low-mobility groups of the population (MGN): People who have difficulty moving independently, receiving services, necessary information, or navigating in space. Disabled people, people with temporary health problems, pregnant women, elderly people, people with baby strollers, etc. are classified as low-mobility groups of the population here (P. B.18, Appendices B, SNiP 31-05–2001).

Таблица 1. Классификация групп мобильности по СНиП 35-01–2001**Table 1.** Classification of mobility groups according to SNiP 35-01–2001

Группа мобильности Mobility group	Общие характеристики людей групп мобильности General characteristics of persons in mobility groups
M1	Люди, не имеющие ограничений по мобильности, в том числе с дефектами слуха People who do not have mobility restrictions, including those with hearing defects
M2	Немощные люди, мобильность которых снижена из-за старения организма (инвалиды по старости); инвалиды на протезах; инвалиды с недостатками зрения, пользующиеся белой тростью; люди с психическими отклонениями Infirm persons whose mobility is reduced due to aging bodies (old-age disability); disabled persons with prosthetics; visually impaired persons using white canes; persons with mental disabilities
M3	Инвалиды, использующие при движении дополнительные опоры (костыли, палки) Disabled persons in need of additional support (crutches, sticks) when moving
M4	Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках, приводимых в движение вручную Disabled persons moving in manually driven wheelchairs

Что касается излишней жесткости, то в данном случае речь идет о требованиях к исполнению пожаро-безопасных зон, являющихся достаточно серьезными с инженерной точки зрения при отсутствии каких-либо иных вариантов таких зон (наличие системы подпора воздуха, выделение противопожарными преградами с большим пределом огнестойкости).

Кроме того, к одному из главных недостатков, с точки зрения пожарной безопасности, можно было отнести отсутствие требований, четко определяющих параметры путей эвакуации и необходимость наличия пожаробезопасных зон, и, как следствие, *в каждом случае* необходимость их определения расчетным путем, что является существенным пробелом любого нормативного документа.

Тем не менее рассмотрение приведенных недостатков не следует считать критикой СНиП 35-01–2001, поскольку данные нормы не имели альтернативы и являлись серьезным шагом вперед в области пожарной безопасности МГН в зданиях различного назначения. Кроме того, как было сказано выше, все указанные недочеты компенсировались фактической возможностью неисполнения требований

документа, однако их статус в виде строительных норм и правил все-таки выполнил свою роль, обратив внимание на проблему МГН как проектного сообщества, так и надзорных органов.

В течение последующего времени этот вопрос становится все более актуальным и приобретает более серьезный правовой вес. А именно, вступает в силу Градостроительный кодекс [6] (ч. 12 ст. 48), утверждается Постановление правительства № 87 [29], ратифицируется Конвенция [4]. В это же время происходит разделение систем нормирования на «строительную» и «пожарную», действующих в развитие Федеральных законов «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [30] и «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [31] соответственно.

Последнее обстоятельство привело к тому, что в рамках нормативных документов по *пожарной* безопасности требования к обеспечению безопасности МГН фактически отсутствовали, хотя необходимость такой защиты декларировалась Техническим регламентом [31], который даже регламентировал положение о наличии безопасных зон, предназначенных для МГН. В таких условиях сложившегося нормативно-правового поля в части требований пожарной безопасности приходилось руководствоваться «строительными» документами, с учетом того, что требования пожарной безопасности для МГН там уже имелись. Более того, возможность такого использования допускалась ст. 151 Технического регламента [31] и разработчиками «пожарных» норм в виде соответствующих разъяснений.

Вместе с тем, как следует из описанного выше, указанные строительные документы имели существенные недостатки в части требований пожарной безопасности. Кроме того, эти документы не могли ни трактоваться, ни изменяться разработчиками норм МЧС, что негативно сказывалось как на взаимосвязи пожарных сводов правил друг с другом, так и на возможности дальнейшего нормативного развития требований к обеспечению пожарной безопасности МГН.

В свою очередь, развитие этих требований в рамках строительных документов являлось чрезвычайно нелогичным и вызывало непонимание со стороны проектного сообщества. Так, в качестве примера в табл. 2 приведены меняющиеся требования пожарной безопасности, относящиеся к одним и тем же вопросам нормирования, которые подтверждают сказанное.

Как видно из приведенной таблицы, обеспечение выполнения требований пожарной безопасности является непростой задачей с учетом постоянно меняющихся условий и неясности формулировок.

Таблица 2. Изменение требований пожарной безопасности МГН на примере СНиП 35-01–2001, СП 59.13330.2012, СП 59.13330.2016

Table 2. Changes in regulatory requirements ensuring the fire safety of impaired mobility persons. The case of SNiP 35-01–2001, SP 59.13330.2012, Construction Regulations (SP) 59.13330.2016

Направление нормирования Issues regulated	СНиП 35-01–2001 SNiP 35-01–2001	СП 59.13330.2012 SP 59.13330.2012	СП 59.13330.2016 SP 59.13330.2016
Задачи документа Document objectives	Необходимость обеспечения для МГН условий жизнедеятельности, равных с остальными категориями населения The need to ensure the same living environment for impaired mobility persons as that available to other population categories	Необходимость обеспечения для МГН условий жизнедеятельности, равных с остальными категориями населения, основанных на принципах «универсального проекта» The need to ensure the same living environment for impaired mobility persons as that available to other population categories, based on the principles of the “universal project”	Необходимость обеспечения для МГН условий жизнедеятельности, равных с остальными категориями населения, основанных на принципах «универсального проекта» The need to ensure the same living environment for impaired mobility persons as that available to other population categories, based on the principles of the “universal project”
Необходимость выполнения The need to implement the requirement	Определяется заданием на проектирование Determined in the request for proposal	Необходимо применять при новом проектировании. Только в случае реконструкции или капитального ремонта возможно «разумное приспособление» при согласовании задания на проектирование с органами соцзащиты It must be applied in new designs. Only in the case of reconstruction or major repairs, “reasonable adjustment” is possible if the request for proposal is approved by the social security authorities	Необходимо применять при проектировании It must be used in the design
Область применения Scope of application	Проектирование и реконструкция общественных, жилых и промышленных зданий. Не распространяется на стационары лечебных учреждений, специализированные учреждения для проживания инвалидов, жилые многоквартирные дома Design and reconstruction of public, residential and production facilities. It does not apply to hospitals of medical institutions, specialized institutions for the disabled, residential single-family houses	Предназначается для разработки проектных решений при проектировании, реконструкции, капремонте и приспособлении общественных, жилых и производственных зданий. Не распространяется на жилые многоквартирные дома It is designated for the development of design solutions used in the course of designing, reconstructing, overhauling and converting public, residential and industrial facilities. It does not apply to single-family residential buildings	Предназначается для разработки проектных решений общественных, жилых и производственных зданий. Здесь же указано: «Распространяется на проектирование общественных зданий открытого доступа населения». Не распространяется на жилые многоквартирные дома, находящиеся в частной собственности It is designated for the development of design solutions for public, residential and industrial facilities. It also says that: “It applies to the design of public buildings of open access to the public”. It does not apply to residential single-family houses that are privately owned

Направление нормирования Issues regulated	СНиП 35-01-2001 SNiP 35-01-2001	СП 59.13330.2012 SP 59.13330.2012	СП 59.13330.2016 SP 59.13330.2016
Размещение пожаро-безопасных зон Arrangement of fire-safe zones	Вблизи вертикальных коммуникаций. Допускается применение лоджии Near vertical pipelines. Loggias are allowed	В холлах лифтов. Допускается применение лоджии In elevator lobbies. Loggias are allowed	В отдельных помещениях с выходом непосредственно на незадымляемую лестничную клетку или на расстоянии 15 м от лифтового холла или лестничной клетки. Применение лоджии не допускается In separate rooms with direct access to an unlit stairwell or at a distance of 15 m from the elevator lobby or a stairwell. Loggias are not allowed
Требования к конструкциям пожаро-безопасных зон: Requirements for the designs of fire-safe areas:			
Стены / Walls	REI 90	REI 60	REI 45
Перекрытия Ceilings	REI 60	REI 60	REI 45
Двери / Doors	EI 60	EI 60	EI 30

При этом, как правило, наиболее острыми в данном случае были два вопроса. Главный и общий вопрос касался области применения документа. В самом деле, если в СНиП 35-01-2001 при всех его недостатках область применения и *необходимость* применения была четко определена рамками задания на проектирование, то в редакциях СП 59.13330 эта информация умалчивалась, поскольку из формулировок «предназначается для разработки проектных решений ... зданий, *которые должны* обеспечивать для инвалидов ... равные условия жизнедеятельности...» и «...распространяется на проектирование общественных зданий *открытого доступа*...» совершенно не ясно, следует ли применять эти требования ко всем зданиям или только к тем, которые будут доступны для МГН на основании требований какого-либо предписывающего документа.

Второй и более узкий вопрос касался необходимости выполнения требований документа относительно многоквартирных жилых домов общего типа, т.е. не предназначенных специально для проживания МГН. Дело в том, что если достаточно жесткие требования по наличию пожаробезопасных зон и «вытекающих» отсюда инженерных систем пожарной безопасности, как правило, были решаемы в проектах современных общественных зданий и жилых домов повышенной этажности, то их применение к жилым зданиям высотой менее 28 м приводило к необходимости серьезной корректировки и удорожанию про-

екта. При этом допущение отказа от выполнения этих требований ввиду отсутствия квартир, специально предназначенных для МГН, выглядело нелогично и странно на фоне их соблюдения для зданий с большей этажностью или для зданий иного функционального назначения, а полное исключение доступа МГН на указанные объекты противоречило положениям федерального законодательства, в частности ст. 2, 20 Жилищного кодекса [32].

Описанная выше ситуация неизбежно привела к необходимости разработки соответствующих требований в рамках нормативных документов по пожарной безопасности с учетом устранения изложенных недостатков.

Действующие требования пожарной безопасности в части МГН. СП 1.13130.2020

Требования к обеспечению пожарной безопасности МГН на объектах различного назначения были разработаны в 2016–2017 гг. на основе существующих нормативных документов [12–14] и исходя из практики применения их требований с учетом сложившейся системы нормирования в области пожарной безопасности. При этом был подготовлен отдельный раздел, затрагивающий полный комплекс вопросов защиты МГН при пожаре, внесенный в СП 1.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы» [33]. Несмотря на заложенную основу, требования свода

правил не являются компиляцией иных документов, а представляют принципиально новый комплекс требований, интегрированный в систему нормативных документов по пожарной безопасности.

Данный раздел требований к обеспечению пожарной безопасности МГН имеет следующие основные особенности.

1. Область применения. В общих требованиях раздела в первую очередь была четко очерчена область применения регламентируемых требований, являющаяся до этого определенной проблемой, о которой было сказано выше.

Для общественных и производственных объектов в качестве основной была принята концепция необходимости обеспечения пожарной безопасности МГН при осуществлении их доступности в здание. На самом деле, организация доступности МГН требуется далеко не для всех объектов производственных и общественных зданий, следовательно, нет необходимости выполнения соответствующих мероприятий.

Совсем иная ситуация складывается в отношении жилых многоквартирных зданий. Несмотря на то что подавляющее большинство квартир жилого фонда не относятся к специализированным и не приспособлены для *проживания* инвалидов, *доступ* МГН на этажи таких жилых зданий все же осуществляется, например, посредством лифтов и пандусов, которыми пользуются не только МГН. Более того, даже при отсутствии доступа (в зданиях без лифта) в таких квартирах зачастую осуществляется и проживание инвалидов, а также иных граждан, которые временно являются маломобильными. При таких условиях рассматриваемая концепция не является справедливой, поскольку в данном случае необходимо учитывать *возможное* (вероятное) пребывание МГН вне зависимости от данных задания на проектирование или иных условий, в том числе наличия доступности, и предусматривать элементарные требования для обеспечения их безопасности.

С учетом этого сводом правил для этажей жилых зданий (за исключением технических) требуется во всех случаях предусматривать мероприятия, направленные на обеспечение безопасности МГН. Нужно отметить, что это автоматически не означает необходимость выполнения полного комплекса требований строительных норм (ширину путей движения, наличие специальных проектных решений и т.д.) в связи с возможным наличием инвалида, а лишь предполагает выполнение «минимальных» требований пожарной безопасности, т.е. тех, которые изложены в разделе 9 СП 1.13130.

2. Усовершенствованная классификация. В рамках нового раздела была модифицирована классификация маломобильных групп населения

с целью возможности более четкого и понятного применения тех или иных требований (табл. 3). Такая модификация была выполнена по «мягкому» варианту, по максимуму реализуя преемственность существующей классификации и не меняя ее радикально. Вместе с тем появились и некоторые серьезные отличия. Можно отметить следующие основные особенности новой классификации.

Во-первых, из нее были исключены обычные граждане, не имеющие ограничения по мобильности, наличие которых в данном случае выглядело неестественно, поскольку не предполагало для них каких-либо особых параметров и не упоминалось в контексте этой классификации ни в одном из нормативных документов. Вместо этого к группе М1 были отнесены люди со сниженной мобильностью, как правило, составляющие значительную долю населения, которые и ранее относились к маломобильным, но нормативно не имели каких-либо отличительных характеристик, за исключением площади проекции (люди пенсионного возраста, беременные женщины, люди с детьми дошкольного возраста, глухие и слабослышащие). Для учета этой группы не предлагается отдельных требований к объемно-планировочным решениям, путям эвакуации. Однако при проведении расчета параметров путей эвакуации в соответствии с Методикой [34] требуется учитывать наличие таких граждан путем снижения средней скорости их движения на 20 %. Кроме того, само по себе их наличие в рамках указанной классификации представляется важным и необходимым.

Во-вторых, стал более логичным состав групп М2–М4. А именно, в группах М2 и М3 акцент сместился на немощных пожилых инвалидов и маломобильных, пользующихся дополнительными опорами, соответственно. При этом для группы М3 к таким людям стали относить не только инвалидов, а любых людей на протезах или с иными опорами. Аналогичные изменения коснулись группы М4.

В-третьих, классификация была дополнена тремя новыми группами, придающими ей законченный вид — немобильные (НМ), нетранспортабельные (НТ) и люди с ограниченной степенью свободы (НО). Несмотря на отсутствие полного спектра требований к указанным группам (например, к НО), часть требований все-таки присутствует в достаточном объеме, а остальная часть имеет перспективу для разработки и необходимый ориентир на данную классификацию.

3. Исходные данные. Исходные данные для проектирования системы пожарной безопасности являлись определенной проблемой, поскольку их отсутствие, например в части количества маломобильных, не позволяло принимать объективные решения и даже приводило к противоречиям

Таблица 3. Классификация групп мобильности по СП 1.13130.2020
Table 3. Classification of mobility groups according to SP 1.13130.2020

Группы мобильности Mobility Group	Общие характеристики людей групп мобильности General characteristics of mobility groups
M1 ¹	Люди, не имеющие инвалидности со сниженной мобильностью (люди пенсионного возраста, люди с детьми дошкольного возраста, беременные женщины), а также глухие и слабослышащие Persons without disabilities that encompass impaired mobility (persons of retirement age, persons having preschool children, pregnant women), as well as deaf and hearing impaired persons
M2	Пожилые немощные люди (в том числе инвалиды по старости), инвалиды с недостатками зрения, пользующиеся белой тростью Elderly infirm persons (including old-age invalids), visually impaired people using white canes
M3	Инвалиды и другие маломобильные граждане, не относящиеся к группе M2, использующие при движении дополнительные опоры (костыли, трости), инвалиды на протезах Disabled persons and other persons having impaired mobility, not belonging to M2 group, using additional supports (crutches, canes) when moving, disabled persons using prostheses
M4	Инвалиды и другие маломобильные граждане, не относящиеся к группе M2, передвигающиеся на креслах-колясках Disabled and other persons with impaired mobility, not belonging to M2 group, moving in wheelchairs
HM ² / NM ²	Немобильные граждане Immobile citizens
HT ³ / NT ³	Нетранспортабельные люди Non-transportable persons
НО / NO	Люди с ограниченной степенью свободы, в том числе люди с психическими отклонениями Persons with a limited degree of freedom, including those with mental disabilities

Примечание:

¹ Значения скорости людей для группы M1 при расчете времени эвакуации следует принимать уменьшенным на 20 % по отношению к данным расчетной методики [2] для людей без ограничения мобильности.

² Люди, не имеющие возможности передвигаться самостоятельно (например, люди с травмами опорно-двигательного аппарата). Людей, передвигающихся несамостоятельно на кресле-коляске, следует относить к группе «НМ».

³ Люди, действия по транспортировке которых являются недопустимыми вследствие прямой угрозы жизни, вызванной такой транспортировкой.

Note:

¹ The values of the speed of persons for the M1 group when calculating the evacuation time should be reduced by 20 % relative to the data of the calculation methodology [2] for persons without mobility restrictions.

² Persons who are unable to move independently (for example, people with injuries of the musculoskeletal system). People who do not move independently in a wheelchair should be referred to the "NM" group.

³ People whose transportation actions are unacceptable due to a direct threat to life caused by such transportation.

при взаимодействии с экспертными и надзорными организациями, поскольку зачастую эти данные принимались из разных (в том числе рекомендательных) источников.

В новой редакции СП 1.13130 количество МГН однозначно определено и указано для зданий различной функциональной пожарной опасности (Табл. 21 СП 1.13130). Более того, приведено их соотношение между группами М2–М4 ($M2/M3/M4 = 0,25/0,6/0,15$).

Единственным вопросом, как правило возникающим в этом случае, является вопрос о необходимости учета МГН на этажах жилых зданий, который частично описан выше в настоящей статье. А именно наиболее часто встречающийся на практике случай предполагает наличие одного человека группы МГН на каждом этаже многоквартирного жилого здания и выполнение соответствующих мероприятий для данного случая. При этом суще-

ствует две крайности в трактовке, что, безусловно, является недостатком документа.

Первая (позиция проектировщика-заказчика) состоит в отнесении данного человека к группе М2 или М3, что фактически не приводит к выполнению каких-либо дополнительных мероприятий с точки зрения пожарной безопасности и является достаточно формальным подходом. Вторая (позиция эксперта) предполагает, что данного человека необходимо относить к группе М4, что ведет к необходимости наличия пожаробезопасных зон, а главное, может рассматриваться как обязательное наличие одного инвалида группы М4 при пожаре на *каждом* этаже. Это, в свою очередь, может приводить, например, к недостатку лифтов для их спасения, а также к необходимости выполнения полного комплекса требований строительных норм. Эта позиция

для проектирования системы пожарной безопасности жилых зданий является чрезмерно жесткой.

Вместе с тем цель нового раздела СП 1.13130 — обеспечение необходимого уровня защиты МГН наряду с сохранением общепринятых и проверенных проектных решений с их минимальной корректировкой, и принимая во внимание экономическую составляющую такой корректировки, т.е. своего рода принцип «универсального дизайна» в области пожарной безопасности. Поэтому смысл, заложенный в требования свода правил, в данном случае предполагает *возможное (вероятное)* присутствие одного человека МГН на этаже здания с учетом того, что он может относиться к любой из групп (в самом неблагоприятном случае — к группе М4) и выполнение соответствующих мероприятий для данной группы (М4). При этом присутствие М4 на каком-либо конкретном этаже не может быть определено и не регламентируется, а их общее количество для всего здания может быть определено в соответствии с приведенным соотношением — $M2/M3/M4 = 0,25/0,6/0,15$. Таким образом, например, для 20-этажного односекционного жилого здания с площадью этажа не более 550 м² количество МГН группы М4 будет составлять 3 человека, М2 и М3 — 5 и 12 человек соответственно. Однако требования по мероприятиям для защиты МГН будут применяться к каждому этажу в предположении, что там может находиться человек группы М4.

4. Пожаробезопасные зоны (ПБЗ). Важным преимуществом нового документа является значительное увеличение количества типов пожаробезопасных зон. В соответствии с определением свода правил *пожаробезопасная зона* — это помещение (или иная часть здания), выделенное противопожарными преградами, оснащенное (при необходимости) системами противопожарной защиты в соответствии с требованиями нормативных правовых актов, свода правил и предназначенное для защиты людей, относящихся к категории мало-мобильных групп населения, от опасных факторов во время пожара.

В рамках требований СП 1.13130 предусмотрена возможность применения четырех типов пожаробезопасных зон. Вместе с тем, как и в случае с классификацией, была частично реализована преемственность уже существующих требований. В качестве пожаробезопасной зоны 1-го типа предлагается использовать специально предназначенное для этого помещение, выделенное конструкциями с нормируемым пределом огнестойкости и обеспеченное необходимыми инженерными системами, что представляет собой «классический» вариант пожаробезопасной зоны (рис. 2). Однако даже для

данного варианта имеются принципиальные особенности реализации.

Если ранее таким помещением могло являться *любое* из помещений здания, соответствующее требованиям к ограждающим конструкциям и имеющее систему противодымной защиты, то требованиями СП 1.13130 нормируются также необходимые и возможные варианты выхода из этого помещения. На самом деле, возможность размещения пожаробезопасной зоны в любом из помещений, реализуемая ранее, с точки зрения пожарной безопасности являлась крайне неэффективной, поскольку выход из такой зоны при пожаре, например, только в общий коридор не позволял говорить о безопасном перемещении граждан, нуждающихся в помощи, даже с помощью пожарных подразделений.

Напротив, концепция создания пожаробезопасных зон, заложенная в СП 1.13130, всегда предполагает возможность *дальнейшего перемещения* МГН непосредственно наружу за пределы здания. Поэтому даже для 1-го типа ПБЗ в виде отдельного помещения предусмотрены соответствующие требования для учета этого принципа.

ПБЗ 2-го и 3-го типов исходя из практики проектирования являются очень востребованными решениями, поскольку фактически не предусматривают дополнительных обременений для проекта, а главное, обеспечивают необходимый уровень защиты от пожара (рис. 3, 4). В частности, ранее у многих представителей проектного сообщества вызывало непонимание отсутствие возможности использования в качестве ПБЗ соседних пожарных отсеков или иных защищенных пространств, тем более что аналогичные решения часто используются за рубежом (рис. 5).

Данные решения действительно обладают достаточной эффективностью, поэтому в рамках рассматриваемого свода правил они используются не только для защиты МГН, но и для реализации принципа *поэтапной горизонтальной эвакуации* в зданиях различного назначения.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение 4-го типа ПБЗ, который представляет собой эвакуационную лестничную клетку (в том числе обычных типов) и по требованиям свода правил может использоваться только для жилых зданий (рис. 6). Введение возможности применения таких ПБЗ продиктовано серьезными проблемами выполнения зон первых трех типов, главным образом для жилых зданий высотой менее 28 м, которое ведет фактически к полному пересмотру проекта, не говоря уже об экономической составляющей такой корректировки. Но речь в данном случае не идет о бездумном ослаблении требований пожарной безопасности в угоду финансовой стороне вопроса. Возможность применения такого решения

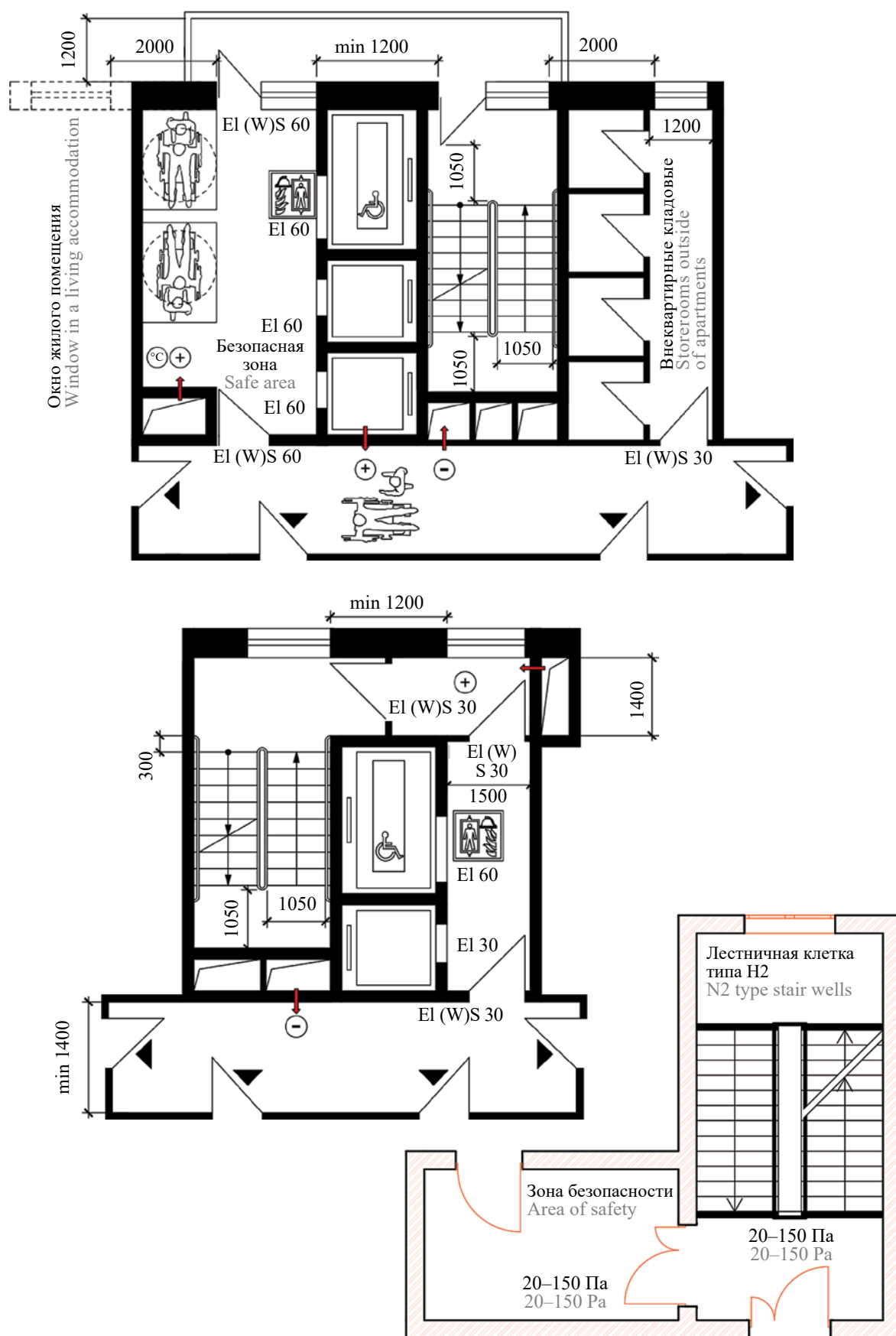


Рис. 2. Примеры пожаробезопасной зоны 1-го типа

Fig. 2. Examples of type 1 fire-safe area

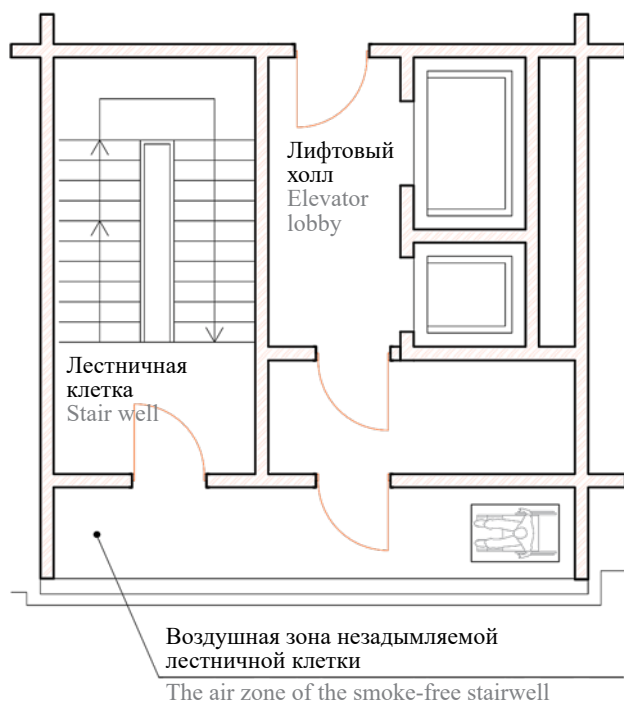


Рис. 3. Пример пожаробезопасной зоны 2-го типа

Fig. 3. Examples of type 2 fire-safe zone

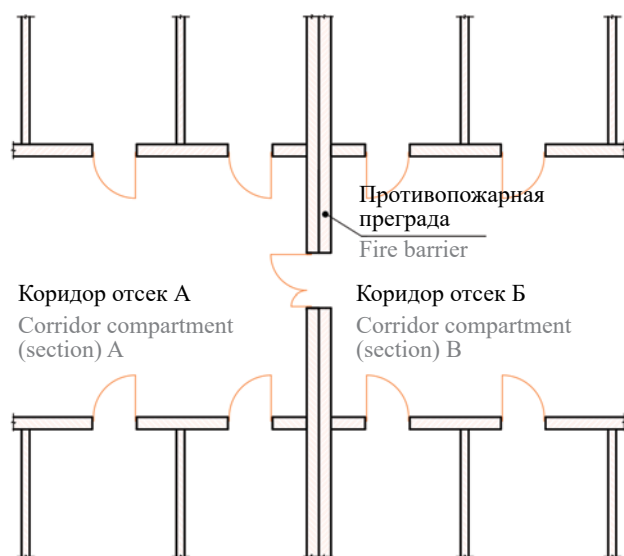


Рис. 4. Пример пожаробезопасной зоны 3-го типа

Fig. 4. Examples of type 3 fire-safe area

объясняется вероятностным подходом наличия МГН той или иной группы на этаже здания, о котором было сказано выше. В этом случае достигается необходимый баланс между безопасностью и возможностью минимальной корректировки уже существующих проектных решений. Дополнительная же эффективность его применения связана с повышением уровня безопасности для обычных граждан, так как это решение не является чем-то отдельным, а «встроено» в общую систему безопасности эвакуационных путей и выходов, поскольку сопутствующим решением в данном



Рис. 5. Здание больницы в Нидерландах (развитая общая часть и периферийные блоки отделений предполагают реализацию схемы поэтапной горизонтальной эвакуации в соседний пожарный отсек (секцию))

Fig. 5. Hospital building in the Netherlands (an elaborate common area and peripheral units of departments suggest a phased horizontal evacuation route to the adjacent fire compartment (section))

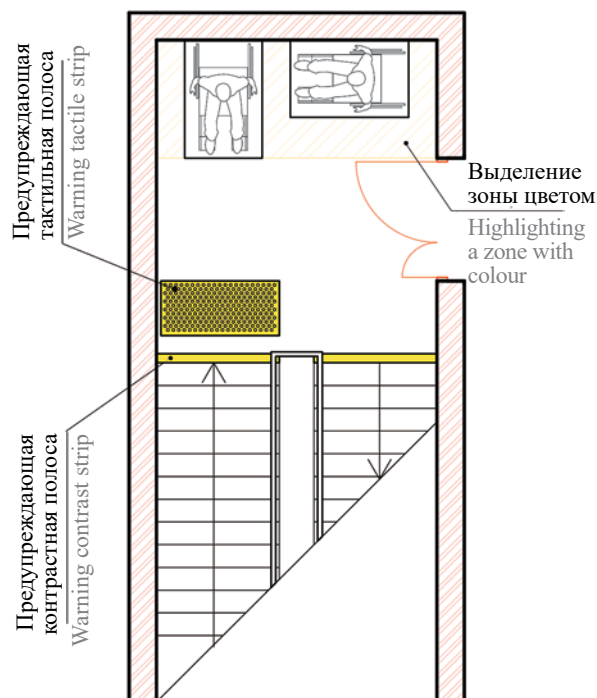


Рис. 6. Пример пожаробезопасной зоны 4-го типа

Fig. 6. Example of type 4 fire-safe zone

случае является необходимость устройства дверей, ведущих из приквартирных холлов на лестничные клетки, в противопожарном исполнении.

Нельзя не сказать и о недостатках данного решения, которые требуют частичной корректировки свода правил. Во-первых, речь идет о случае специализированного жилого дома для проживания МГН, для которого размещение ПБЗ на лестничной клетке нельзя назвать безопасным решением, а вероятностный подход верным. Во-вторых, для жилых зданий высотой 3 этажа и менее в соответствии с требова-

ниями свода правил наличие приквартирных холлов не является обязательным, поэтому решение о возможности размещения ПБЗ на площадках лестничной клетки является больше формальным и служит лишь для сохранения общей концепции обязательного наличия ПБЗ.

Остальные положения раздела требований к обеспечению безопасности МГН в основном относятся к определению параметров эвакуационных путей и выходов и не представляют интереса для подробного описания. Единственная существенная особенность, которую необходимо отметить в данном случае, это отсутствие необходимости проведения каких-либо дополнительных расчетов, как это было ранее, для определения необходимости наличия пожаробезопасных зон и расстояний до них. Эти параметры четко регламентируются требованиями свода правил, а такая позиция в части определения тех или иных характеристик, вообще говоря, и должна быть главной целью любого нормативного документа.

Необходимость или избыточность?

Развитие нормативной базы, описанное выше, привело к наличию дополнительных требований, регулирующих вопросы пожарной безопасности в части МГН. Естественно, что подобное «ужесточение» не всегда воспринимается однозначно, поскольку является дополнительной нагрузкой, возникшей фактически только по причине признания на государственном уровне проблемы доступа инвалидов. Особенно остро вопрос стоит в отношении необходимости выполнения дополнительных требований о защите МГН в жилых зданиях. Позиция, связанная с нежеланием выполнения дополнительных требований, имеет под собой основания, ведь ранее пожарная безопасность объекта считалась обеспеченной без мероприятий, касающихся МГН. А главное — отсутствует соответствующее обоснование как необходимости, так и эффективности подобных мероприятий. Проще говоря, эти мероприятия воспринимались избыточными и ненужными, эффективность и необходимость которых ничем не подтверждена.

Поэтому в настоящий момент существует два противоположных мнения относительно перспектив дальнейшего развития данного направления. Первое заключается в допустимости полного отсутствия защиты МГН в силу необъективности/сложности мероприятий, малого количества МГН, дополнительной финансовой нагрузки и иных причин. Второе предполагает обеспечение максимальной защиты вне зависимости от сложности мероприятий, финансовой нагрузки и даже реально возможного количества МГН на объекте.

Оба указанных мнения в силу своей радикальности не могут быть признаны справедливыми, поскольку первый подход противоречит федеральному законодательству и обладает дискриминационной составляющей по отношению к МГН, которые вообще лишаются противопожарной защиты, при этом не обладая мобильностью наравне с другими категориями населения.

Второй подход не является достаточно обоснованным и требует больших материальных затрат. Кроме того, задача стопроцентного обеспечения безопасности не является корректной, поскольку недостижима даже по отношению к людям без ограничения мобильности.

Таким образом, в текущей ситуации наиболее правильным представляется некий сбалансированный подход, лишенный каких-либо крайностей. Необходимо, конечно, признать, что и такой подход не лишен субъективности, так как в настоящее время отсутствует такое направление, как оценка экономической целесообразности тех или иных противопожарных мероприятий, статистика несовершенна и нормы не предполагают возможности отступлений по причине «экономики» даже при наличии каких-либо обоснований.

Основные доводы в пользу необходимости такой сбалансированной защиты указаны ниже.

1. Количество людей, относящихся к МГН, как следует из данных статистики, достаточно велико.

2. Число пострадавших при пожаре среди этих людей также значительно (табл. 4).

3. Из таблицы хорошо видно, что проблема обеспечения безопасности именно в жилье наиболее серьезна (количество погибших в зданиях иного функционала пренебрежимо мало и не внесено в таблицу). Конечно, данная статистика требует более глубокого анализа и имеет много пробелов. В частности:

- отсутствует информация по степени мобильности МГН (данные в таблице относятся к инвалидам вообще, что, как правило, подразумевает официальное наличие у человека инвалидности);
- отсутствуют данные по раненым и пострадавшим;
- нет информации о причине гибели (неясно, насколько возможное отсутствие тех или иных мероприятий для МГН послужило причиной гибели);
- отсутствует информация о наличии мероприятий для защиты МГН (наличие ПБЗ, виды путей эвакуации и т.д.).

С другой стороны, число погибших МГН от их общего количества невелико, хотя и не укладывается в допустимое значение пожарного риска, составляющее 10^{-6} в год в соответствии с положениями [31].

Таблица 4. Количество погибших инвалидов в зданиях различного назначения за период 2009–2021 гг. (данные статистики ВНИИПО)**Table 4.** The number of disabled persons killed in buildings having various functions in 2009–2021 (VNIPO statistics data)

Объект пожара Burning object	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Количество погибших людей, чел. Number of dead persons, persons												
Садовый дом, дача и др. Country house, cottage, etc.	26	20	17	27	26	21	14	16	13	20	11	8	12
Вагончик для жилья, дом мобильного типа, палатка и др. строение Trailer, mobile type house, tent, and other structure	9	6	2	4	1	2	1	1	3	2	1	0	0
Надворная постройка Outbuildings	21	15	14	12	19	7	21	7	5	12	9	15	11
Прочее здание жилого назначения, надворная постройка Other residential building, outbuildings	6	9	8	8	14	12	15	8	14	8	9	6	3
Одноквартирный жилой дом Single-family residential building	489	475	433	406	349	322	298	298	241	235	228	223	205
Многоквартирный жилой дом Apartment building	416	365	355	329	254	245	232	232	193	208	226	216	217
Гараж, тент-укрытие и т.д. на территории домовладения Garage, tent-shelter, etc. in the household	4	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	3	1
Баня, сауна на террито- рии домовладения Bath, sauna in the house- hold	6	5	3	3	3	3	5	5	10	2	5	0	2
Лечебное учреждение со стационаром (мед. центр, больница, госпи- таль, роддом и др.) Medical institution with a hospital (medical centre, hospital, military hospital, maternity hospital, etc.)	1	1	0	0	36	1	23	0	0	0	0	1	0
Учреждение социального обслуживания населения со стационаром (попечи- тельское учреждение, дом-интернат для преста- релых и инвалидов и др.) Social security institution with a hospital (guardian- ship institution, nursing home for the elderly, handicapped, etc.)	1	5	1	2	1	0	0	1	0	0	2	1	3

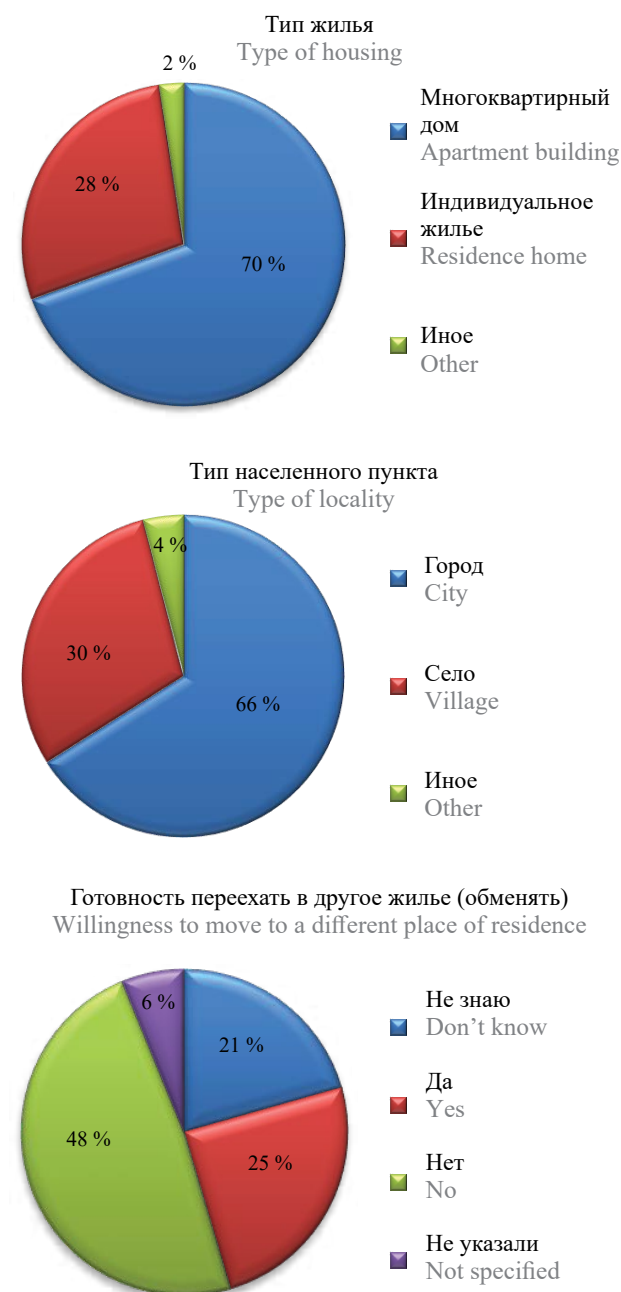


Рис. 7. Данные Общественной палаты об условиях проживания МГН

Fig. 7. Data on residential conditions of impaired mobility groups provided by the Public Chamber

Таким образом, если речь идет о возможности отсутствия защиты МГН при пожаре в принципе, то этот вопрос больше стоит скорее в социальной плоскости, чем в области пожарной безопасности. В этом случае должна быть принята соответствующая методика целесообразности выполнения тех или иных требований норм, основывающаяся на экономической оценке стоимости человеческой жизни.

4. Возможность переселения МГН в рамках жилого фонда на первые этажи зданий является

почти нереализуемой задачей, поскольку, во-первых, представляет собой достаточно длительный процесс, во-вторых, непрактична для людей с временными травмами, в-третьих, зачастую противоречит желанию самих маломобильных людей.

В частности, на рис. 7 представлены данные опроса Общественной палаты по вышеуказанной проблеме, из которых хорошо видно, что минимальная защита МГН при пожаре в многоквартирных жилых зданиях актуальна. Как видно из представленных диаграмм, большинство из опрошенных являются городскими жителями, проживающими в многоквартирных домах. При этом почти половина опрошенных не готова переехать в другое жилье, даже если такая возможность будет предоставлена государством.

Все вышеизложенное свидетельствует, что проблема необходимости защиты МГН является актуальной, но в то же время неоднозначной. Имеются сложности в части необходимых исследований и обоснований в рамках нормирования соответствующих требований, но и говорить о возможности не замечать данный вопрос некорректно.

Таким образом, цель норм в данном случае должна заключаться не в создании дополнительных сложностей, а в разработке сбалансированных и эффективных решений, которые будут направлены на обеспечение безопасности всех людей на объекте, а не отдельно для МГН или обычных граждан. Именно такое направление *интегрированной* защиты, при всех указанных недостатках, заложено в принцип защиты от пожара МГН в рамках новой редакции СП 1.13130. Это касается допустимых видов ПБЗ, необходимости защиты лестничных клеток при размещении в них ПБЗ противопожарными дверями, четких требований к путям эвакуации и иных преимуществ, описанных выше. Дальнейшее развитие документа по этой концепции должно совершенствовать предлагаемый сбалансированный подход, избегая каких-либо крайностей, заставляющих делать выбор между необходимостью защиты и избыточностью требований.

Выводы

В рамках настоящей статьи выполнено.

1. Исследование формирования комплекса нормативных требований в части защиты МГН от пожара.
2. Детально рассмотрены и проанализированы действующие нормативные требования, в том числе к пожаробезопасным зонам, определению количества МГН на объекте, их классификации и т.п.
3. Анализ существующих проблем в части нормирования, а также целесообразности применения требований к защите МГН в настоящее время.

На основе проведенной работы сделан вывод о необходимости выполнения защиты МГН в рамках требований нормативных документов по пожарной безопасности. Однако указанные требования должны предусматривать сбалансированные и эффективные решения, позволя-

ющие повысить уровень пожарной безопасности не только для МГН, а для всех людей на объекте, а также учитывать практику применения современных строительных решений, экономическую составляющую и иные аспекты существующих реалий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Положение инвалидов. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964>
2. Барановский А.С., Карпов А.В., Усолкин С.В., Ушаков Д.В. Анализ существующих нормативных требований по обеспечению безопасности маломобильных групп населения при пожарах // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 2 (194). С. 36–39.
3. О социальной защите инвалидов в РФ : Федеральный закон № 181-ФЗ принят Государственной Думой 20.07.1995 ; одобрен Советом Федерации 15.11.1995. М., 1995.
4. О ратификации Конвенции о правах инвалидов : Федеральный закон № 46-ФЗ принят Государственной Думой 25.04.2012 ; одобрен Советом Федерации 27.04.2012. М., 2012.
5. Государственная программа Российской Федерации «Доступная среда». URL: <https://mintrud.gov.ru/ministry/programms/3/0>
6. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 190-ФЗ принят Государственной Думой 22.12.2004 ; одобрен Советом Федерации 24.12.2004. М., 2004.
7. Крюков А.Р., Смунова Н.Ю., Семикин П.П. Приспособление жилого фонда для проживания маломобильных групп населения // Жилищное строительство. 2012. № 11. С. 22–25.
8. Дубынин Н.В. Доступность жилища инвалидам при крупнопанельном домостроении // Жилищное строительство. 2012. № 7. С. 38–42.
9. Единые санитарные правила для предприятий (производственных объединений), цехов и участков, предназначенных для использования труда инвалидов и пенсионеров по старости : утв. заместителем главного государственного санитарного врача СССР А.И. Заиченко № 2672-83, 01.03.1983.
10. Типовая инструкция по обеспечению передвижения инвалидов, пользующихся креслами-колясками, в проектах общественных зданий, планировки и застройки населенных мест. М. : Госкомархитектуры, 1988.
11. ВСН 62-91*. Проектирование среды жизнедеятельности с учетом потребностей инвалидов и маломобильных групп населения. М. : Госкомархитектуры, 1991.
12. СНиП 35-01–2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. М. : ГУП ЦПП, 2001.
13. СП 59.13330.2012. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01–2001. М. : Минстрой России, 2015.
14. СП 59.13330.2016. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01–2001. М. : Стандартинформ, 2017.
15. СП 31-102-99. Свод правил по проектированию и строительству. Требования доступности общественных зданий и сооружений для инвалидов и других маломобильных посетителей. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000.
16. О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ по вопросам социальной защиты инвалидов в связи с ратификацией Конвенции о правах инвалидов : Федеральный закон № 419-ФЗ принят Государственной Думой 21.11.2014 ; одобрен Советом Федерации 26.11.2014. М., 2014.
17. СНиП 2.01.02-85*. Строительные нормы и правила. Противопожарные нормы. М. : Госстрой СССР, 1991.
18. СНиП 21-01-97*. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М. : ГУП ЦПП, 2002.
19. СНиП 2.08.02-89*. Общественные здания и сооружения. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.
20. Организация эвакуации при пожарах, стихийных бедствиях, чрезвычайных ситуациях для обеспечения безопасности маломобильных групп населения : Отчет к Государственному контракту № 1.1.1/23. М., 1998.
21. Кирюханцев Е.Е., Холщевников В.В., Шурин Е.Т. Первые экспериментальные исследования движения инвалидов в общем потоке // Безопасность людей при пожарах : сборник статей. М., 1998.
22. Шурин Е.Т., Самошин Д.А. Результаты экспериментов по определению некоторых параметров эвакуации немобильных людей при пожаре // Системы безопасности : 10-я научно-техническая конференция. М., 2001.
23. Шурин Е.Т., Самошин Д.А. Пожаробезопасные зоны // Пожарное дело. 2001. № 5. С. 40–41.

24. Холщевников В.В., Никонов С.А., Шамгунов Р.Н. Моделирование и анализ движения людских потоков в зданиях различного назначения : учебное пособие. М., 1986.
25. Самошин Д.А. Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 1. С. 33–46.
26. Шурип Е.Т., Анаков А.В. Выделение групп населения по мобильным качествам и индивидуальное движение в людском потоке как основа моделирования движения «смешанных» людских потоков при эвакуации // Проблемы пожарной безопасности в строительстве : сборник статей. М., 2001. С. 36–42.
27. МГСН 4.03-94. Дома-интернаты для инвалидов и престарелых. М. : Правительство Москвы, 1994.
28. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2006.
29. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановление Правительства Российской Федерации № 87 : утв. Правительством Российской Федерации 16.02.2008. М., 2008.
30. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ принят Государственной Думой 23.12.2009 ; одобрен Советом Федерации 25.12.2009. М., 2009.
31. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ принят Государственной Думой 04.07.2008 ; одобрен Советом Федерации 11.07.2008. М., 2008.
32. Жилищный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 188-ФЗ принят Государственной Думой 22.12.2004 ; одобрен Советом Федерации 24.12.2004. М., 2004.
33. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. М. : Стандартинформ, 2020.
34. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382. URL: <http://pravo.gov.ru/>

REFERENCES

1. *The situation of the disabled*. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (rus).
2. Baranovsky A.S., Karpov A.V., Usolkin S.V., Ushakov D.V. Analysis of existing regulatory requirements for ensuring the safety of low-mobility groups of the population during fires. *Life Safety*. 2017; 2(194):36-39. (rus).
3. On Social protection of disabled people in the Russian Federation : Federal Law No. 181-FZ was adopted by the State Duma on July 20, 1995 ; approved by the Federation Council on November 15, 1995. Moscow, 1995. (rus).
4. On the ratification of the Convention on the Rights of Persons with Disabilities : Federal Law No. 46-FZ was adopted by the State Duma on April 25, 2012 ; approved by the Federation Council on April 27, 2012. Moscow, 2012. (rus).
5. The State Program of the Russian Federation “Accessible Environment”. URL: <https://mintrud.gov.ru/ministry/programms/3/0> (rus).
6. The town-planning code of the Russian Federation : Federal Law No. 190-FZ was adopted by the State Duma on December 22, 2004 ; approved by the Federation Council on December 24, 2004. Moscow, 2004. (rus).
7. Kryukov A.R., Smurova N.Yu., Semikin P.P. Adaptation of the housing stock for the residence of low-mobility groups of the population. *Housing Construction*. 2012; 11:22-25. (rus).
8. Dubynin N.V. Accessibility of housing for the disabled in large-panel housing construction. *Housing Construction*. 2012; 7:38-42. (rus).
9. Uniform sanitar.rules for enterprises (production associations), workshops and sites intended for the use of labor of disabled people and old-age pensioners: approved by Deputy Chief State Sanitary Doctor of the USSR A.I. Zaichenko No. 2672-83, 01.03.1983. (rus).
10. Standard instructions for ensuring the movement of disabled people using wheelchairs in projects of public buildings, planning and development of populated areas. Moscow, Goskomarchitektury Publ., 1988. (rus).
11. VSN 62-91*. Designing the living environment taking into account the needs of the disabled and low-mobility groups of the population. Moscow, Goskomarchitecture Publ., 1991. (rus).
12. SNiP 35-01–2001. Accessibility of buildings and structures for low-mobility groups of the population. Moscow, GUP CPP, 2001. (rus).
13. SP 59.13330.2012. Accessibility of buildings and structures for low-mobility groups of the population. Updated edition of SNiP 35-01–2001. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2015. (rus).
14. SP 59.13330.2016. Accessibility of buildings and structures for low-mobility groups of the population. Updated edition of SNiP 35-01–2001. Moscow, Standartinform Publ., 2017. (rus).
15. SP 31-102-99. A set of rules for design and construction. Requirements for accessibility of public buildings and structures for the disabled and other low-mobility visitors. Moscow, Gosstroy of Russia, GUP CPP Publ., 2000. (rus).
16. On Amendments to Certain legislative Acts of the Russian Federation on social protection of persons with disabilities in connection with the ratification of the Convention on the Rights of Persons with Disabilities : Federal Law No. 419-FZ adopted by the State Duma on

- November 21, 2014 : approved by the Federation Council on November 26, 2014. Moscow, 2014. (rus).
17. SNiP 2.01.02-85*. Building codes and regulations. Fire safety standards. Moscow, Gosstroy of the USSR Publ., 1991. (rus).
 18. SNiP 21-01-97*. Building codes and regulations of the Russian Federation. Fire safety of buildings and structures. Moscow, GUP TSPP Publ., 2002. (rus).
 19. SNiP 2.08.02-89*. Public buildings and structures. Moscow, Gosstroy of Russia, GUP CPP, 2003. (rus).
 20. Organization of evacuation in case of fires, natural disasters, emergency situations to ensure the safety of low-mobility groups of the population : Report to the State Contract No.1.1.1/23. Moscow, 1998. (rus).
 21. Kiryukhantsev E.E., Kholshchevnikov V.V., Shurin E.T. The first experimental studies of the movement of disabled people in the general flow. *Safety of people in case of fires : collection of articles*. Moscow, 1998. (rus).
 22. Shurin E.T., Samoshin D.A. The results of experiments to determine some parameters of evacuation of immobile people in case of fire. *Safety systems : 10th scientific and technical conference*. Moscow, 2001. (rus).
 23. Shurin E.T., Samoshin D.A. Fire-safe zones. *Firefighting*. 2001; 5:40-41. (rus).
 24. Kholshchevnikov V.V., Nikonov S.A., Shamgunov R.N. *Modeling and analysis of the movement of human flows in buildings for various purposes : textbook*. M., 1986. (rus).
 25. Samoshin D.A. Calculation of the evacuation time of people. Problems and prospects. *Fire and Explosion Safety/Fire and Explosion Safety*. 2004; 1:33-46. (rus).
 26. Shurin E.T., Apakov A.V. Allocation of population groups by mobile qualities and individual movement in the human flow as a basis for modeling the movement of "mixed" human flows during evacuation. *Problems of Fire Safety in Construction : collection of articles*. Moscow, 2001; 36-42. (rus).
 27. MGSN 4.03-94. Boarding houses for the disabled and elderly. Moscow, Moscow Government, 1994. (rus).
 28. GOST 12.1.004-91. The system of occupational safety standards. *Fire safety. General requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. (rus).
 29. On the composition of sections of project documentation and requirements for their content : Decree of the Government of the Russian Federation No. 87 ; approved. The Government of the Russian Federation February 16, 2008. Moscow, 2008. (rus).
 30. Technical Regulations on the safety of buildings and structures: Federal Law No. 384-FZ adopted by the State Duma December 23, 2009 ; approved by the Federation Council December 25, 2009. Moscow, 2009. (rus).
 31. Technical regulations on fire safety requirements: Federal Law No. 123-FZ adopted by the State Duma July 4, 2008 ; approved by the Federation Council July 11, 2008. Moscow, 2008. (rus).
 32. Housing Code of the Russian Federation : Federal Law No. 188-FZ adopted by the State Duma December 22, 2004 ; approved by the Federation Council December 24, 2004. Moscow, 2004. (rus).
 33. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. Moscow, Standartinform Publ., 2020. (rus).
 34. On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated June 30, 2009 No. 382. URL: <http://pravo.gov.ru/> (rus).

Поступила 18.11.2022, после доработки 27.12.2022;
принята к публикации 19.01.2023

Received November 18, 2022; Received in revised form December 27, 2022;
Accepted January 19, 2023

Информация об авторе

БАРАНОВСКИЙ Алексей Сергеевич, старший научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1062586; ResearcherID: HKV-5019-2023; ORCID: 0000-0003-3305-1712; e-mail: komnata110@yandex.ru

Information about the authors

Alexey S. BARANOVSKY, Senior Researcher, Department of Fire Safety of Industrial Facilities, Technologies and Modeling of Man-made Accidents, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1062586; ResearcherID: HKV-5019-2023; ORCID: 0000-0003-3305-1712; e-mail: komnata110@yandex.ru

Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины

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

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. Широкое и эффективное внедрение в практику строительства жилых зданий конструкций из перекрестноклееной древесины обуславливает необходимость разработки современных требований к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий в части ограничения распространения пожара, обеспечения возможности безопасной эвакуации и спасения находящихся в этих зданиях людей, повышения результативности действий пожарных подразделений при проведении спасательных работ и пожаротушении, а также оптимизации затрат на объемно-планировочные и конструктивные решения.

Цели и задачи. Целью статьи является разработка актуализированных требований к системам противопожарной защиты одно- и двухэтажных зданий из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей, разработка новых современных требований к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий высотой до четырех этажей включительно, а также разработка технических решений, позволяющих реализовать данные требования, базирующихся на положениях Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ).

Методы. Используется аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины, а также технических решений, позволяющих реализовать данные требования для зданий высотой до 4 этажей на основе комплексного применения положений № 123-ФЗ с учетом накопленного опыта проектирования, результатов огневых испытаний строительных конструкций на огнестойкость и пожарную опасность, а также результатов расчетов влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей при пожаре.

Результаты. Внедрение результатов работы в стандарты организаций и своды правил, позволяющие обеспечить массовое строительство жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины.

Выводы. На основе исследований проведено обоснование современных противопожарных требований к объемно-планировочным и конструктивным решениям, пределам огнестойкости и классам пожарной опасности строительных конструкций жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины, а также требований к эвакуационным выходам и путям эвакуации, составу активных систем противопожарной защиты и функциональной эффективности данных систем.

Результаты работ позволяют обеспечить массовое строительство жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины высотой до 4 этажей включительно.

Ключевые слова: предел огнестойкости; класс пожарной опасности; противопожарная преграда; эвакуация; спасение; допустимая высота здания; пожаробезопасная зона

Для цитирования: Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Голкин А.В. Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 28–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40.

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

Modern requirements for fire protection of multi-apartment residential buildings having structures made of cross-laminated timber

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

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. Widespread and effective introduction of cross-laminated timber structures into construction of residential buildings substantiates the need to develop modern requirements for the design of fire protection systems for these buildings to limit the spread of fire, ensure safe evacuation and rescue of people from these buildings, increase the effectiveness of firefighters performing rescue operations and fire suppression, and optimize the cost of space-planning and design solutions.

Goals and objectives. The purpose of the article is to substantiate modern requirements for the design of fire protection systems of residential buildings having not more than four storeys, if their structures are made of cross-laminated timber, and to develop engineering solutions to implement these requirements in compliance with provisions of the Federal Law of the Russian Federation dated July 22, 2008 No. 123-FZ "Technical regulations on fire safety requirements" (hereinafter — No. 123-FZ).

Methods. An analytical method is used to substantiate and formulate requirements for the design of fire protection systems for residential buildings whose structures are made of cross-laminated timber, as well as the engineering solutions needed to implement these requirements for buildings having up to 4 floors in compliance with provisions of No. 123-FZ, the design experience, results of fire resistance and fire hazard testing of building structures and analysis of the influence of the fire resistance factor of building structures on human safety in case of fire.

Results. The results of the work, if integrated into standards of corporate entities and codes of practice, allow for the mass construction of residential buildings having structures made of cross-laminated timber.

Conclusions. This research project substantiated modern fire safety requirements for space-planning and design solutions, fire resistance limits and fire hazard classes of cross-laminated timber structures of residential buildings, as well as requirements for emergency exits and evacuation routes, composition of active fire protection systems and the functional efficiency of these systems.

The results of the work allow for the mass construction of 4-storey residential buildings whose structures are made of cross-laminated timber.

Keywords: fire resistance limit; fire hazard class; fire barrier; evacuation; rescue; allowable building height; fire safety area

For citation: Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Gomofov A.V., Golkin A.V. Modern requirements for fire protection of multi-apartment residential buildings having structures made of cross-laminated timber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):28-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40 (rus).

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

Введение

Современная архитектура предполагает широкое применение деревянных конструкций при строительстве жилых и общественных зданий. Для этого внедряются новые технологии обработки древесины, среди которых одной из наиболее перспективных является технология производства конструкций из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей, представляющих собой изготовленные заводским способом деревянные массивные плиты, состоящие не менее чем из трех ортогонально склеенных слоев из цельных или сращенных по длине на зубчатое соединение досок согласно [1, 2]. Данные панели имеют высокие показатели прочности, с учетом чего они применяются в качестве несущих опор и балок, плит перекрытий и стеновых панелей (внешних и внутренних). Технология производства CLT-панелей позволяет производить панели высокой степени готовности — с вырезанными проемами для дверей и окон, что значительно упрощает технологию их монтажа.

Вместе с тем широкое внедрение CLT-панелей в практику строительства многоквартирных жилых зданий невозможно без разработки современных противопожарных требований к системам противопожарной защиты этих зданий, а также разработки технических решений, позволяющих реализовать данные требования.

Это связано с тем, что применение открытых (без огнезащитной облицовки) панелей в конструкции перекрытий и внутренних стен жилых зданий, имеющих класс пожарной опасности КЗ, обуславливает необходимость классификации этих зданий как зданий класса конструктивной пожарной опасности СЗ согласно [3]. Однако нормативные документы по пожарной безопасности не содержат требований по проектированию многоквартирных зданий класса конструктивной пожарной опасности СЗ при их высоте более 2-х этажей в части допустимой высоты, площади этажа в пределах пожарного отсека, устройства противопожарных преград и стен лестничных клеток (в том числе узлов их примыкания к конструкциям класса К1-К3), шахт и каналов для инженерных коммуникаций, составу и функциональной эффективности инженерного оборудования противопожарной защиты и т.д.

Кроме того, существующие нормативные противопожарные требования, позволяющие проектировать одно- и двухэтажные жилые здания с ненормируемыми показателями по пределам огнестойкости и классам пожарной опасности строительных конструкций, разработанные несколько десятилетий назад, не учитывают современные возможности строительства подобных зданий и не в полной мере отражают современные представления о необходимом уровне безопасности людей при эвакуации

и спасении, т.е. требуют корректировки и дополнений с учетом современных тенденций в обеспечении безопасности и строительстве зданий и сооружений.

При разработке требований учитывалось, что особенностью пожаров в жилых зданиях из деревянных конструкций является существенное увеличение выделения массы горючих газов и паров из-за пиролиза нагреваемой древесины стен и перекрытий по сравнению со зданиями из негорючих конструкций, где пиролизу подвергается только мебель, деревянные полы и т.д. Следствием такого увеличения выделения горючих газов и паров является не только более интенсивное горение в помещении очага пожара, но и выбросы пламени на фасад здания, а также на пути эвакуации, что значительно осложняет эвакуацию и спасение людей и способствует быстрому распространению горения по зданию.

Целью настоящей статьи является разработка актуализированных требований к системам противопожарной защиты одно- и двухэтажных зданий из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей, а также разработка новых требований к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий высотой 3 и 4 этажа в части объемно-планировочных и конструктивных решений, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, обеспечения эвакуации и спасения людей, используемых строительных материалов, составу инженерного оборудования систем противопожарной защиты и функциональной эффективности данных систем. Кроме того, целью статьи является разработка технических решений, обеспечивающих реализацию новых требований.

При этом использован аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты на основе комплексного применения положений Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ) [3], результатов огневых испытаний конструкций из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей, результатов расчетной оценки влияния фактора огнестойкости на безопасность людей при эвакуации и спасении.

Объемно-планировочные и конструктивные решения

Особенности конструктивного исполнения жилых зданий с конструкциями из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей предполагают применение открытых (без огнезащитной облицовки) панелей в конструкциях перекрытий и внутренних стен жилых зданий, с учетом чего данные конструкции имеют класс пожарной опасности КЗ,

а здания — класс конструктивной пожарной опасности СЗ [3], при котором требования к классу пожарной опасности конструкций не предъявляются.

Положениями [4, 5] предусмотрено, что здания этого класса конструктивной пожарной опасности могут проектироваться одно- и двухэтажными. При этом требования к пределам огнестойкости конструкций таких зданий также могут не предъявляться (здания могут иметь V степень огнестойкости). Данные требования сохранялись неизменными на протяжении последних нескольких десятков лет и позволяли исключить необходимость подтверждения пределов огнестойкости и классов пожарной опасности конструкций протоколами испытаний и сертификатами, упростить проектирование и снизить затраты на строительство.

Вместе с тем современные исследования о влиянии фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей [6, 7] показывают, что необходимый уровень безопасности при эвакуации и спасении в 2-этажных жилых зданиях может быть обеспечен только при условии, что предел огнестойкости несущих элементов здания будет не менее R 30, внутренние стены лестничных клеток, межквартирные стены и стены, отделяющие внеквартирный коридор от квартир, имеют предел огнестойкости REI 30/EI 30.

Как показали огневые испытания, CLT-панели позволяют обеспечить данные требования по огнестойкости при толщине панелей не менее 120 мм. С учетом этого для сохранения преемственности нормативных положений, позволяющих не регламентировать требования к пределу огнестойкости строительных конструкций при проектировании зданий высотой не более 2 этажей, новыми дополнительными требованиями предусмотрено обеспечить использование в этих зданиях в качестве несущих элементов, а также межквартирных стен, внутренних стен лестничных клеток и стен, отделяющих внеквартирный коридор от квартиры, панелей толщиной не менее 120 мм. Кроме того, для этих зданий класс пожарной опасности стен лестничных клеток и противопожарных преград К0 за счет конструктивной огнезащиты панелей (2 листами ГКЛ и др.).

Трех- и четырехэтажные жилые здания согласно нормативным требованиям [4, 5] должны быть не ниже III степени огнестойкости. С учетом того, что применение деревянных конструкций вызовет более интенсивное горение в помещении очага пожара, для исключения преждевременного разрушения здания в период проведения спасательных работ новыми дополнительными требованиями предусмотрено использование конструкций с повышенными пределами огнестойкости (см. табл.). Вместе с тем высокая конструктивная пожарная опасность таких зданий

обуславливает возможность его полного и относительно быстрого выгорания, что требует ограничения размеров пожарных отсеков и количества пожарных секций в пределах пожарного отсека. С учетом этого здания должны проектироваться как односекционные с площадью этажа в пределах пожарного отсека не более 550 м² и высотой не более 12 м (высота определяется согласно [8]). Ограничение высоты здания предусмотрено также с целью упростить возможность спасения людей через оконные проемы с помощью ручных пожарных лестниц [9].

Вне зависимости от высоты в жилых зданиях с конструкциями из CLT-панелей необходимо реализовать следующие новые дополнительные противопожарные мероприятия.

При проектировании этих зданий не допускается устройство в них газового оборудования, мусоропроводов и мусоросборных камер, каминов и бань (саун), а также размещение в подвальных и цокольных этажах помещений любого функционального назначения за исключением помещений для инженерного оборудования, технического обслуживания и внеквартирных кладовых в зданиях III степени огнестойкости.

Новые требования предусматривают, что для ограничения возможности перехода пожара из подземной части в жилые помещения подвальные и цокольные этажи, а также технические подполья должны отделяться от надземной части объекта противопожарными перекрытиями 2-го типа класса К0.

Кроме того, новыми требованиями предусмотрено, что при применении горючих материалов для теплоизоляции цоколей и надземной части фундаментов зданий (на высоту не более 0,8 м от уровня земли или отмостки) необходимо обеспечить их защиту с внешней стороны негорючими материалами толщиной не менее 30 мм в антивандальном исполнении (цементно-песчаной штукатуркой по сетке, керамической плиткой и т.п.). Практическая апробация данного требования показала, что его реализация позволяет значительно упростить и снизить затраты на утепление цоколей и фундаментов, с учетом чего оно распространено на все типы зданий путем внесения в [10].

Для исключения распространения горения по деревянным конструкциям в обход противопожарных преград разработаны новые требования, согласно которым необходимо, чтобы противопожарные перекрытия 3-го типа и перегородки 1-го (в том числе предназначенные для отделения помещений общественного назначения от жилых) пересекали наружные стены, выполненные из деревянных конструкций. При этом противопожарные перегородки 1-го типа допускается проектировать с примыканием к глухим участкам наружных

стен (простенкам) с нормируемым пределом огнестойкости, т.е. без пересечения данных простенков, только при ширине простенков не менее 1,2 м.

Реализация положений ч. 15 ст. 88 № 123-ФЗ [3] предполагает, что во всех зданиях вне зависимости от степени огнестойкости и этажности ограждающие конструкции каналов и шахт для прокладки коммуникаций должны соответствовать требованиям, предъявляемым к противопожарным перегородкам 1-го типа и перекрытиям 3-го типа. Разработанные новые дополнительные требования предусматривают, что данные ограждения должны иметь класс К0 и выполняться из негорючих (НГ) материалов. При этом расположенные друг над другом на разных этажах помещения должны иметь самостоятельные вентиляционные каналы, что позволит исключить распространение огня и дыма между этажами по каналам и шахтам, в том числе по вентиляционным каналам, что особенно актуально для жилых зданий, вентиляционные каналы которых не защищаются противопожарными клапанами.

Для жилых зданий высотой 3 и 4 этажа с деревянными конструкциями из CLT-панелей разработаны следующие новые дополнительные противопожарные требования.

С учетом того, что данные здания проектируются III степени огнестойкости в подвальных и цокольных этажах допускается устройство внеквартирных хозяйственных кладовых. При этом должны выполняться следующие условия:

- помещение каждой кладовой должно иметь площадь не более 10 м² и выделяться противопожарными перегородками с пределом огнестойкости не менее EI 60 и противопожарными перекрытиями 2-го типа;
- помещения кладовых должны оборудоваться автоматическими установками пожаротушения, внутренним противопожарным водопроводом и СОУЭ не ниже 3-го типа;
- из коридоров подвального этажа должна быть предусмотрена система вытяжной противодымной вентиляции;
- в кладовых не допускается хранение взрывоопасных веществ и материалов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, масел, баллонов с горючими газами, баллонов под давлением, автомобильных (мотоциклетных) шин (покрышек), пиротехнических изделий, аккумуляторных батарей, в том числе установленных на средствах передвижения.

Поскольку для 3 и 4-этажных зданий с наружными деревянными стенами из CLT-панелей фактор распространения пожара по фасаду играет ключевую роль в обеспечении возможности безопасной эвакуации и спасения людей, разработаны следующие

новые дополнительные противопожарные требования, позволяющие ограничить горение наружных ограждений зданий.

1. Наружные стены должны быть защищены фасадными системами, разработанными на основе технических свидетельств (ТС), которые подтверждают класс пожарной опасности К0 с применением материалов облицовки, отделки и теплоизоляции НГ, Г1. Материалы ветровлагозащитных мембран не должны относиться к группе горючих легко-возгораемых материалов по [11] ГОСТ Р 56027. В составе навесных фасадных систем (НФС) должны быть предусмотрены противопожарные отсеки из материалов НГ в уровне междуэтажных перекрытий. По периметру оконных проемов необходимо предусмотреть противопожарные отсеки или противопожарные короба (согласно ТС на данные НФС). Для исключения распространения огня внутрь деревянных конструкций через откосы оконных и наружных дверных проемов данные откосы должны защищаться негорючими материалами толщиной не менее 25 мм или 2 листами ГКЛ.

2. Плиты балконов, выполненные из древесины (CLT-панелей), должны быть облицованы снизу и сверху материалами НГ или Г1 толщиной не менее 3 мм.

3. Конструкции карнизов, подшивки карнизных свесов чердачных покрытий следует выполнять из материалов НГ, Г1 либо выполнять обшивку данных элементов листовыми материалами группы горючести не менее Г1. Для указанных конструкций не допускается использование горючих утеплителей (за исключением пароизоляции толщиной до 2 мм), и они не должны способствовать скрытому распространению горения.

4. В бесчердачных и чердачных покрытиях кровлю следует выполнять из негорючих материалов. Для указанных зданий допускается выполнять кровлю из горючих материалов, уложенную на сплошную конструкцию основания под кровлю, выполненную из негорючих материалов. При этом группа пожарной опасности кровли по [12] должна соответствовать КПО.

5. Козырьки над входом в здание, а также кровлю входного тамбура следует выполнять из негорючих материалов.

Для обеспечения массового строительства жилых зданий на основе CLT-панелей требуется не только разработка требований к пределам огнестойкости и классам пожарной опасности их строительных конструкций, но и обоснование технических решений, позволяющих реализовать данные требования на практике. С учетом того, что современные методы расчета пределов огнестойкости деревянных конструкций не позволяют с достаточной степенью

точности оценить пределы огнестойкости узлов примыкания деревянных элементов, результаты расчетов пределов огнестойкости панелей проанализированы совместно с результатами огневых испытаний, что позволило определить оптимальные конструктивные решения в части необходимой толщины различных элементов, и изложены в таблице.

Для обеспечения требуемых пределов огнестойкости и классов пожарной опасности деревянных конструкций, указанных в таблице, следует применять только конструктивную огнезащиту.

Испытания показали, что наиболее эффективным техническим решением по обеспечению класса пожарной опасности К0 (45) для стен, перегородок и перекрытий из CLT-панелей является их облицовка двумя гипсокартонными листами согласно стандарту [13] или двумя плитами гипсовыми строительными по стандарту [14], а для обеспечения класса пожарной опасности К0 (15) — облицовка одним листом перечисленных выше материалов.

Для огнестойких строительных конструкций и противопожарных преград на основе CLT-панелей с облицовкой гипсокартонными листами или плитами гипсовыми строительными необходимо разработать дополнительные противопожарные мероприятия, обеспечивающие защиту мест их пересечения инженерными коммуникациями.

Возможность использования других технических решений по конструктивной огнезащите, а также технических решений по устройству узлов примыкания, кабельных и трубных проходок и т.д. должна подтверждаться результатами огневых испытаний.

Обеспечение эвакуации и спасения людей

Для проектирования путей эвакуации в зданиях высотой не более 2-х этажей следует применять Положения [8]. При этом для 2-этажных зданий эвакуация может быть предусмотрена на лестничную клетку типа Л1, имеющую выход непосредственно наружу. Но с учетом применения в конструкциях здания деревянных CLT-панелей в качестве дополнительного мероприятия необходимо предусмотреть устройство эвакуационного выхода из квартир на лестничную клетку через межквартирный коридор.

С учетом наличия у данных зданий фасадов из горючих материалов, что ограничивает возможность спасения людей из окон, для обеспечения их спасения путем перемещения из квартир по лестничной клетке, согласно [6, 7], необходимо обеспечить предел огнестойкости несущих элементов здания не менее R 30 и предел огнестойкости REI 30/EI 30 для внутренних стен лестничных клеток, межквартирных стен и стен, отделяющих многоквартирный коридор от квартир.

Пределы огнестойкости и классы пожарной опасности строительных конструкций

Fire resistance limits and fire hazard classes of building structures

Строительная конструкция Building construction	Особенности конструктивного исполнения Design features	Предел огнестойкости Fire resistance limit	Класс пожарной опасности Fire hazard class
Противопожарные перекрытия 2-го типа (в том числе междуэтажные перекрытия, отделяющие межквартирные коридоры (холлы) для отделения помещений подвального или цокольного этажа (технического подполья) от надземной части объекта — несущий элемент здания) Fire-prevention floors of the 2nd type (including floor-to-floor ceilings separating inter-apartment corridors (halls) to separate the premises of the basement or basement floor (service basement) from the above-ground part of the facility as the bearing element of the building)	НГ материалы (железобетон), CLT-панели толщиной не менее 180 мм с огнезащитной облицовкой снизу и бетонной стяжкой не менее 20 мм сверху и герметизацией (заделкой) стыков NG materials (reinforced concrete), CLT panels with a thickness of, at least, 180 mm with fire-retardant cladding on the bottom, a concrete screed of, at least, 20 mm on top and sealed joints	REI 60	K0 (45)
Противопожарные перекрытия 3-го типа для отделения помещений общественного назначения от жилых помещений — несущие элементы здания Type 3 fireproof ceilings for separating public premises from residential premises as load-bearing elements of the building	НГ материалы (железобетон), CLT-панели толщиной не менее 180 мм с огнезащитной облицовкой снизу и бетонной стяжкой не менее 20 мм сверху и герметизацией (заделкой) стыков NG materials (reinforced concrete), CLT panels with a thickness of, at least, 180 mm with fire-retardant cladding on the bottom and a concrete screed of, at least, 20 mm on top and sealed joints	REI 45	K0 (45)
Внутренние стены лестничных клеток (несущие элементы здания) Internal walls of stairwells (bearing elements of the building)	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки), с опиранием на конструкции с пределом огнестойкости не менее R 60, CLT-панели толщиной не менее 180 мм с конструктивной огнезащитой со всех сторон, с опиранием на конструкции с пределом огнестойкости не менее R 60 NG materials (reinforced concrete, bricks, blocks), supported by structures with a fire resistance rating of, at least, R 60, CLT panels with the thickness of, at least, 180 mm with structural fire protection on all sides, supported by structures with a fire resistance rating of, at least, R 60	REI 60	K0 (45)
Наружные стены лестничных клеток: External walls of stairwells:	CLT панели толщиной не менее с конструктивной огнезащитой: CLT panels having minimum thickness and structural fire protection:		Изнутри: K0 (45); K0 (15) снаружи —
запроектированы как несущие элементы designed as load-bearing elements	180 мм / 180 mm	R 60/E 15	см. наружные стены с внешней стороны
не являются несущими элементами are not load-bearing elements	120 мм / 120 mm	E 15/E 15	From the inside: K0 (45) K0 (15) outside — see external walls from the outside

Строительная конструкция Building construction	Особенности конструктивного исполнения Design features	Предел огнестойкости Fire resistance limit	Класс пожарной опасности Fire hazard class
Междуэтажные перекрытия между жилыми помещениями (квартирами) и чердачные перекрытия (являются несущими элементами) Floors between residential premises (apartments) and attic floors (are load-bearing elements)	CLT-панели толщиной не менее 180 мм с бетонной стяжкой не менее 20 мм сверху и герметизацией (заделкой) стыков CLT panels with the thickness of, at least, 180 mm with a concrete screed of, at least, 20 mm on top and sealed joints	REI 60	K3 (45)
Стены межквартирные: Inter-apartment walls:	CLT-панели толщиной не менее: CLT panels with the thickness of, at least:		
запроектированы как несущие элементы designed as load-bearing elements	180 мм / 180 mm	R 60/EI 30	K3 (45)
не являются несущими элементами are not load-bearing elements	120 мм / 120 mm	EI 30	K3 (30)
Стены и перегородки, отделяющие межквартирные коридоры (холлы) от других помещений: Walls and partitions separating inter-apartment corridors (halls) from other premises:	CLT-панели толщиной не менее с конструктивной огнезащитой со всех сторон: CLT panels with the minimum thickness and structural fire protection on all sides:		
запроектированы как несущие элементы designed as load-bearing elements	180 мм / 180 mm	REI 60	K0 (45)
не являются несущими элементами are not load-bearing elements	120 мм / 120 mm	EI 45	K0 (45)
Наружные стены: Exterior walls:	CLT-панели толщиной не менее: CLT panels with the thickness of, at least:		Сторона внутренняя/ внешняя: From the inside/outside:
запроектированы как несущие элементы designed as load-bearing elements	180 мм / 180 mm	R 60/E 15	K3 (45)/K0
не являются несущими элементами are not load-bearing elements	120 мм / 120 mm	E 15	K3 (15)/K0
—	НФС с внешней стороны NFS from the outside		K0
Бесчердачные покрытия: Open roofs:	CLT-панели толщиной не менее: CLT panels with the thickness of, at least:		
запроектированы как несущие элементы designed as load-bearing elements	180 мм / 180 mm	R 60/E 15	K3 (45)
не являются несущими элементами are not load-bearing elements	120 мм / 120 mm	RE 15	
	Сверху — теплоизоляция из материалов группы горючести НГ, кровля НГ или Г1. При применении горючих материалов группа пожарной опасности кровли по [12] должна соответствовать КПО Thermal insulation is made of materials of the NG combustibility group, roofing is labelled as NG or G1. When combustible materials are used, according to [12], the fire hazard group of the roof must correspond to KP0		

Окончание табл. / End of the Table

Строительная конструкция Building construction	Особенности конструктивного исполнения Design features	Предел огнестойкости Fire resistance limit	Класс пожарной опасности Fire hazard class
Стены шахт пожарных лифтов Fire elevator shaft walls	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки), с опиранием на бетонные перекрытия с пределом огнестойкости REI 120 NG materials (reinforced concrete, bricks, blocks), rest on concrete floors with the fire resistance rating of REI 120	REI 120	K0 (45)
Стены (перегородки) пожаробезопасных зон в виде холлов перед пожарными лифтами Walls (partitions) of fireproof areas in the form of halls in front of fire elevators	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки), с опиранием на бетонные перекрытия NG materials (reinforced concrete, bricks, blocks), supported by concrete floors	REI 60	K0 (45)
Марши и площадки лестниц Flights and landings of stairs	НГ материалы (железобетон) NG materials (reinforced concrete)	R 45	K0 (45)
Противопожарные перегородки 1-го типа для выделения помещений общественного назначения Fireproof partitions of the 1st type for public premises	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки) NG materials (reinforced concrete, brick, blocks)	EI 45	K0 (45)
Каналы и шахты Canals and shafts	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки) NG materials (reinforced concrete, brick, blocks)	EI 45	K0 (45)
Стены шахт лифтов, расположенных вне лестничных клеток Walls of the elevator shafts located outside the stairwells	НГ материалы (железобетон, штучные материалы: кирпич, блоки), с опиранием на бетонные перекрытия NG materials (reinforced concrete, bricks, blocks), resting on concrete floors	EI 45	K0 (45)
Внутриквартирные стены и перегородки Interior walls and partitions	CLT-панели толщиной не менее 100 CLT panels with the thickness of, at least, 100	н.н. n.s.	н.н. n.s.
Чердачные покрытия Attic roofings	CLT-панели толщиной не менее 50 мм. С конструктивной огнезащитой со стороны чердака для обеспечения K0. При применении горючих материалов группа пожарной опасности кровли по [12] должна соответствовать КПО CLT panels with the thickness of, at least, 50 mm. Structural fire protection from the side of the attic to ensure K0. When combustible materials are used, the fire hazard group of the roof, pursuant to [12], must correspond to KP0	н.н. n.s.	K0 (15)

н.н. — не нормируется

n.s. — not standardized

Дополнительными требованиями для проектирования эвакуации в зданиях высотой 3 и 4 этажа предусмотрено устройство незадымляемой лестничной клетки типа Н2 с выходом из квартир или иных помещений на лестничную клетку через межквартирный коридор (холл). Эвакуационные коридоры должны отделяться от помещений квартир и иных

помещений противопожарными перегородками 1-го типа, с заполнением проемов квартирных дверей противопожарными дверями 2-го типа и защищаться системой вытяжной противодымной вентиляции. Двери незадымляемых лестничных клеток типа Н2 должны предусматриваться противопожарными 2-го типа (кроме дверей выходов наружу).

Это позволяет ограничить распространение опасных факторов пожара из горящих квартир в лестничную клетку.

При проектировании лестничной клетки типа Н2 без оконных проемов в наружных стенах в лестничной клетке должно быть предусмотрено устройство постоянно включенного аварийного (эвакуационного) освещения с электропитанием по первой категории надежности электроснабжения, а также фотолюминесцентных элементов в соответствии с требованиями [15].

При устройстве выхода из незадымляемой лестничной клетки типа Н2 непосредственно наружу через вестибюль указанный вестибюль должен быть отделен от других помещений и коридоров противопожарными перегородками 1-го типа.

Эвакуация маломобильных групп населения должна обеспечиваться в соответствии с [8, 16], а пожаробезопасные зоны должны быть предусмотрены в лифтовых холлах перед лифтами для транспортирования пожарных подразделений или на площадках незадымляемых лестничных клеток типа Н2.

При этом расстояние от двери наиболее удаленной квартиры до выхода на лестничную клетку или в пожаробезопасную зону не должно превышать 10 м.

Дополнительными требованиями предусмотрено, что в зданиях высотой 3 и 4 этажа отделка стен, потолка и пола за пределами квартир (т.е. во внеквартирных коридорах, холлах, лестничных клетках, пожаробезопасных зонах и т.д.) должна быть выполнена из негорючих материалов. С учетом этого деревянные CLT-панели стен и потолков на перечисленных выше путях эвакуации должны защищаться листами гипсокартонными по [13] или плитами гипсовыми строительными по [14], по которым и должна выполняться облицовка и отделка негорючими материалами (данные листы и панели служат основанием для облицовки и отделки негорючими материалами). Деревянное основание полов из CLT-панелей перед облицовкой негорючими материалами должно быть защищено цементной стяжкой толщиной не менее 25 мм.

Для лестничных клеток вновь разработанными требованиями предусмотрено, что стены лестничных клеток должны пересекать покрытие и возвышаться над ним не менее чем на 0,3 м. Покрытие над лестничной клеткой в зданиях высотой 2 этажа должно иметь предел огнестойкости не менее REI 30 и класс пожарной опасности K0 (30), а люк в покрытии должен иметь предел огнестойкости EI 15. Покрытие над лестничной клеткой в зданиях в 3 и 4 этажа должно иметь предел огнестойкости не менее REI 45 и класс пожарной опасности K0 (45), а люк в покрытии должен иметь предел огнестойкости EI 30. Покрытие над

лестничной клеткой, запроектированной как пожаробезопасная зона, должно иметь предел огнестойкости не менее REI 60 и класс пожарной опасности K0 (45), а люк в покрытии должен иметь предел огнестойкости EI 60.

Внутренние стены лестничных клеток в местах примыкания к наружным ограждающим конструкциям зданий должны их пересекать или примыкать к глухим участкам наружных стен без зазоров. При этом расстояние по горизонтали между проемами лестничной клетки и проемами в наружной стене здания должно быть не менее 1,4 м, а узел примыкания должен иметь предел огнестойкости, равный пределу огнестойкости внутренней стены лестничной клетки по признакам EI. Данные требования позволяют ограничить возможность распространения пожара в лестничную клетку, которое будет сопровождаться не только стремительным развитием пожара по всем этажам здания в целом, но и блокированием единственного пути эвакуации с этажей и пути перемещения пожарных подразделений внутри здания.

Для зданий высотой 3 и 4 этажа предъявляются более жесткие требования к подъездам для пожарных автомобилей, так подъезд для данных зданий должен быть обеспечен с двух продольных сторон.

Кроме того, в квартирах, расположенных на 2–4 этажах, необходимо предусмотреть аварийные выходы в соответствии с требованиями [8]. Данные решения позволяют обеспечить возможность спасения людей с помощью автолестниц и раздвижных пожарных лестниц со всех сторон здания, в том числе в случае выброса пламени из окон здания с одной из его сторон.

Требования к инженерному оборудованию систем противопожарной защиты

Дополнительными относительно положений [17] требованиями для зданий высотой 3 и 4 этажа предусмотрено использование систем пожарной сигнализации (СПС) адресного типа с установкой дымовых пожарных извещателей в межквартирных коридорах и помещениях квартир (прихожие, жилые помещения и кухни), также на объекте необходимо предусматривать автоматическое дублирование сигнала о срабатывании систем противопожарной защиты в подразделение пожарной охраны с использованием системы передачи извещений о пожаре. Это позволяет не только идентифицировать место возникновения пожара и передать сигнал о пожаре в пожарную часть, но и обеспечить своевременное прибытие пожарных подразделений.

Для обеспечения необходимого уровня безопасности людей для зданий высотой 3 и 4 этажа необходимо оборудование этих зданий СОУЭ 3-го типа.

Наличие в здании открытых деревянных CLT-панелей в конструкциях стен и перекрытий создает дополнительную горючую нагрузку, которая приведет в условиях пожара к интенсивному выбросу пламени из наружных оконных проемов, а также из квартир на пути эвакуации. С учетом этого для обеспечения эффективных действий пожарных подразделений по тушению пожара дополнительными требованиями предусмотрено увеличение расхода воды на наружное пожаротушение зданий высотой 3 и 4 этажа относительно положений [18] до величины не менее 30 л/с. Расстановка пожарных гидрантов на водопроводной сети должна обеспечивать подачу воды с расчетным расходом на пожаротушение любой точки здания на уровне нулевой отметки не менее чем от двух гидрантов с учетом прокладки рукавных линий длиной не более 200 м по дорогам с твердым покрытием.

Кроме того, должно быть предусмотрено устройство в этих зданиях внутреннего противопожарного водопровода, проектируемого по [19] и обеспечивающего расход не менее 2,5 л/с от одного пожарного крана, который размещается во внеквартирных коридорах, а также в подвальном или цокольном этаже при наличии в них внеквартирных хозяйственных кладовых. В квартирах в качестве первичного средства внутриквартирного пожаротушения необходимо предусмотреть установку малорасходного пожарного крана (с расходом воды от 0,2 до 1,5 л/с), укомплектованного ручным пожарным стволом (распылителем) и накрученным на барабан пожарным рукавом или шлангом, длина которого должна обеспечивать возможность подачи воды в любую точку квартиры. Пожарный кран подключается к трубопроводу внутреннего противопожарного водопровода или сети хозяйственно-питьевого водопровода.

Дополнительными относительно положений [17] требованиями для зданий высотой 3 и 4 этажа предусмотрено использование спринклерных автоматических установок пожаротушения (АУП) в нежилых помещениях, а также в расположенных в подвальном или цокольном этаже внеквартирных хозяйственных кладовых. Проектирование АУП должно выполняться в соответствии с требованиями к проектированию 1-й группы помещений по [20].

Для зданий высотой 3 и 4 этажа удаление продуктов горения при пожаре системами вытяжной противодымной вентиляции следует предусматривать из межквартирных коридоров и вестибюлей, сообщающихся с незадымляемой лестничной клеткой типа Н2, а также коридоров подвальных или цокольных этажей при наличии в них внеквартирных хозяйственных кладовых, а подпор воздуха при пожаре системами приточной противодымной вентиляции следует предусматривать в незадымля-

емые лестничные клетки типа Н2, пожаробезопасные зоны, лифтовые шахты лифтов для пожарных. Для обеспечения надежной работы противопожарных клапанов необходимо предусматривать автоматический контроль целостности линий электроснабжения и управления, состояния конечного положения заслонок (створок), с выдачей аварийного сигнала на пульт диспетчерской службы. Кроме того, интервал периодических испытаний систем приточно-вытяжной противодымной вентиляции по [21] ГОСТ Р 53300–2009 должен быть предусмотрен не реже одного раза в год.

Для снижения пожарной опасности электрооборудования распределительные сети от этажных распределительных щитов до квартирных щитов, а также групповые сети от квартирных щитов до светильников, штепсельных розеток и других электроприемников квартиры должны прокладываться в штробах и каналах из негорючих материалов или стальных трубах. При этом коробки монтажные, распределительные и установочные, предназначенные для установки в деревянных конструкциях и предназначенные для монтажа в них электроустановочных изделий (выключатель, розетка) и соединения токопроводящих жил, должны быть выполнены из материалов, стойких к воздействию пламени (класс ПВ-0 по [22]) и к воздействию накаливаемой проволоки (850 °С по [23]).

Выводы

Проведены аналитические исследования по разработке актуализированных требований к системам противопожарной защиты одно- и двухэтажных зданий из перекрестноклееной древесины в виде CLT-панелей, а также разработаны новые требования к проектированию систем противопожарной защиты этих зданий высотой 3 и 4 этажа в части объемно-планировочных и конструктивных решений, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, обеспечения эвакуации и спасения людей, используемых строительных материалов, составу инженерного оборудования систем противопожарной защиты и функциональной эффективности данных систем, которые позволяют обеспечить массовое строительство жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины высотой до 4 этажей включительно.

При разработке требований учитывались физические особенности развития пожаров в жилых зданиях из деревянных конструкций, которые обусловлены существенным увеличением выделения горючих газов и паров из-за пиролиза нагреваемой древесины стен и перекрытий по сравнению со зданиями из негорючих конструкций, сопровождающимся

более интенсивным горением в помещении очага пожара, а также выбросами пламени на фасаде здания и на пути эвакуации.

Разработка требований осуществлялась на основе комплексного применения положений Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ), результатов расчетной оценки влияния фактора огнестойкости на безопасность людей при эвакуации и спасении.

Разработка конкретных технических решений, позволяющих реализовать новые требования на практике, базировалась на расчетах пределов огнестойкости плит из деревянных конструкций, а также результатах огневых испытаний, позволяющих оценить пределы огнестойкости узлов примыкания деревянных элементов и определить оптимальные толщины различных деревянных конструкций зданий.

На основе исследований был подготовлен и введен в действие комплекс новых стандартов организаций, позволяющих обеспечить массовое строительство жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины высотой до 4 этажей включительно:

- СТО 06202182-001–2022. Многоквартирные жилые дома до 4 этажей с применением деревянных конструкций, созданных индустриальным способом (из перекрестноклееной древесины). Требования пожарной безопасности;
- СТО 04416677-001–2022. Многоквартирные жилые дома до 4 этажей с применением конструкций из древесины и древесных материалов. Требования пожарной безопасности.

Кроме того, результаты исследований были внедрены в Изменение № 1 к своду правил СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 56706. Национальный стандарт РФ. Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия.
2. ТУ 16.231-001-6202182–2020. Детали и изделия из перекрестноклееной древесины.
3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. Федерального закона от 27 декабря 2018 г. № 538-ФЗ). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/
4. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx>
5. СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01–2003.
6. 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. 33. № 3. С. 49–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95
7. 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. 86–97. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010
8. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx>
9. ГОСТ Р 53275–2009. Техника пожарная. Лестницы ручные пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний.
10. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. Изменение 1.
11. ГОСТ Р 56027–2014. Материалы строительные. Метод испытаний на возгораемость под воздействием малого пламени.
12. ГОСТ Р 56026–2014. Материалы строительные. Метод определения группы пожарной опасности кровельных материалов.
13. ГОСТ 6266–97. Листы гипсокартонные. Технические условия.
14. ГОСТ 32614–2012. Плиты гипсовые строительные. Технические условия.
15. ГОСТ 34428–2018. Системы эвакуационные фотолуминесцентные. Общие технические условия.
16. СП 59.13330.2020. Свод правил. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01–2001.
17. СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. URL: <https://www.standards.ru/document/6713466.aspx>
18. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности. Изменение № 1. URL: <https://www.standards.ru/document/6529214.aspx>

19. СП 10.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Требования пожарной безопасности. Изменение № 1. URL: <https://www.standards.ru/document/6636603.aspx>
20. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. URL: <https://www.standards.ru/document/6713467.aspx>
21. ГОСТ Р 53300–2009. Противодымная защита зданий и сооружений. Методы прямо-сдаточных и периодических испытаний.
22. ГОСТ 28779–90 (МЭК 707–81). Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения воспламеняемости под воздействием источника зажигания.
23. ГОСТ 27483–87 (МЭК 695-21–80). Испытания на пожароопасность. Методы испытаний. Испытания нагретой проволокой.

REFERENCES

1. GOST R 56706. National Standard of the Russian Federation. Slabs glued from sawn timber with a cross arrangement of layers. Specifications. (rus).
2. TU 16.231-001-6202182–2020. Parts and products made of cross-laminated wood. (rus).
3. Technical regulations on fire safety requirements : Federal Law of the Russian Federation No. 123-FZ dated July 22, 2008 (as amended by Federal Law No. 538-FZ of December 27, 2018). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (rus).
4. SP 2.13130.2020. Fire protection systems. Ensuring fire resistance of objects of protection. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx> (rus).
5. SP 54.13330.2016. Residential multi-apartment buildings. Updated edition of SNiP 31-01–2003. (rus).
6. Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomozev A.V., Luchkin S.A. Analyzing the influence of the fire resistance of building structures on human safety in case of a fire. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 33(3):49-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95 (rus).
7. Pekhotikov A.V., Gomozev 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):86-97. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010 (rus).
8. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx> (rus).
9. GOST R 53275–2009. Fire fighting equipment. Manual fire ladders. General technical requirements. Test methods. (rus).
10. SP 2.13130.2020. “Fire protection systems. Ensuring the fire resistance of objects of protection”. Change 1. (rus).
11. GOST R 56027–2014. Building materials. Small flame flammability test method. (rus).
12. GOST R 56026–2014. Building materials. Method for determining the fire hazard group of roofing materials. (rus).
13. GOST 6266–97. Plasterboard sheets. Specifications. (rus).
14. GOST 32614–2012. Gypsum building boards. Specifications. (rus).
15. GOST 34428–2018. Photoluminescent evacuation systems. General specifications. (rus).
16. SP 59.13330.2020. Set of rules. Accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. Updated edition of SNiP 35-01–2001. (rus).
17. SP 486.1311500.2020. Fire protection systems. The list of buildings, structures, premises and equipment subject to protection by automatic fire extinguishing installations and fire alarm systems. URL: <https://www.standards.ru/document/6713466.aspx>
18. SP 8.13130.2020. Fire protection systems. Sources of external fire water supply. Fire safety requirements. Change No. 1. URL: <https://www.standards.ru/document/6529214.aspx> (rus).
19. SP 10.13130.2020. Fire protection systems. Internal fire water supply. Fire safety requirements. Change No. 1. URL: <https://www.standards.ru/document/6636603.aspx> (rus).
20. SP 485.1311500.2020. Fire protection systems. Automatic fire extinguishing installations. Design norms and rules. URL: <https://www.standards.ru/document/6713467.aspx> (rus).
21. GOST R 53300–2009. Smoke protection of buildings and structures. Acceptance and periodic test methods. (rus).
22. GOST 28779–90 (IEC 707–81) Solid electrical insulating materials. (rus).
23. GOST 27483–87 (IEC 695-2-1–80). Fire tests. Test methods. Hotwire test. (rus).

Поступила 12.12.2022, после доработки 18.01.2023;

принята к публикации 25.01.2023

Received December 12, 2022; Received in revised form January 18, 2023;

Accepted January 25, 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 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

ГОЛКИН Алексей Викторович, заместитель начальника отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-2940-0633; e-mail: 2102pro@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

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

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

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

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

The authors declare no conflicts of interests.

Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах

Сергей Викторович Пузач¹✉, Дмитрий Валерьевич Бачурин², Руслан Гянджавиевич Акперов¹, Очир Баатровиц Болдрушкиев¹, Александр Александрович Балаев³

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² НПО «Инженерные решения», г. Москва, Россия

³ 6-я Пожарно-спасательная часть 1-го Пожарно-спасательного отряда Федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по Калужской области, г. Калуга, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мягкие детские игрушки, находящиеся в детских развлекательных зонах многофункциональных торгово-развлекательных комплексов, являются одними из наиболее опасных горючих материалов. Однако пожароопасные свойства мягких игрушек, в особенности качественный и количественный состав образующихся токсичных газов, не исследованы.

Цели и задачи. Целью работы является определение удельных коэффициентов образования и парциальной плотности токсичных газов, образующихся при сгорании мягких игрушек.

Для достижения цели была выполнена модернизация малогабаритной экспериментальной установки и проведены экспериментальные исследования вышеуказанных параметров наиболее опасных токсичных газов, выделяющихся при горении образцов мягких игрушек производства Китая.

Методы. Используется экспериментальный метод исследования процесса образования токсичных веществ при терморазложении образцов мягких игрушек в маломасштабной экспериментальной установке. Проведен анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. Проведена модернизация малогабаритной экспериментальной установки, позволяющая дополнительно измерять концентрации диоксида азота и фосгена.

Получены зависимости от времени с начала опытов удельной массовой скорости выгорания, среднеобъемной парциальной плотности и удельных коэффициентов образования монооксида углерода, циановодорода, фосгена и двуокиси азота.

Обнаружено, что только парциальные плотности циановодорода и фосгена достигают своих критических значений. При этом парциальная плотность циановодорода превышает ее критическую величину в 2,5 раза, а фосгена — в 17 раз. Поэтому необходимо при определении пожарных рисков в детских игровых зонах проводить расчет времени блокирования путей эвакуации по циановодороду и фосгену.

Выводы. При горении мягких детских игрушек выделяются в опасных для жизни и здоровья человека концентрациях такие высокотоксичные газы, как монооксид углерода, циановодород и фосген. Это необходимо учитывать при расчете пожарных рисков в детских игровых зонах и торговых помещениях, где находятся мягкие игрушки.

Ключевые слова: пожар; циановодород; монооксид углерода; фосген; парциальная плотность; токсичность; критическая концентрация

Для цитирования: Пузач С.В., Бачурин Д.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Балаев А.А. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 41–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50.

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

Generation of toxic gases during combustion of stuffed toys in multifunction shopping malls

Sergey V. Puzach¹✉, Dmitriy V. Bachurin², Ruslan G. Akperov¹, Ochir B. Boldrushkiev¹, Alexander A. Balaev³

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² NPO Engineering Solutions, Moscow, Russian Federation

³ 6th Fire and Rescue Unit of the 1st Fire and Rescue Squad of the Federal Fire Service of the State Fire Service of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Kaluga Region, Kaluga, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Stuffed children's toys in children's entertainment areas at multifunction shopping malls are among the most dangerous combustible materials. However, flammable properties of stuffed toys, especially the qualitative and quantitative composition of resulting toxic gases, have not been studied.

Goals and objectives. The aim of the work is to identify specific coefficients of generation and partial density of toxic gases released during the combustion of stuffed toys.

To achieve the goal, a small experimental unit was upgraded and experimental studies of the above parameters were carried out to learn more about the most dangerous toxic gases released during the combustion of specimens of stuffed toys made in China.

Methods. An experimental method was used to study the generation of toxic substances during the thermal decomposition of specimens of stuffed toys in a small experimental unit. The results of the experiment were analyzed.

Results and discussion. The small experimental unit was upgraded so that it could measure concentrations of nitrogen dioxide and phosgene.

Dependences between time and the specific mass burn up rate, the average volumetric partial density, as well as carbon monoxide, hydrogen cyanide, phosgene, and nitrogen dioxide generation coefficients were obtained for the period starting from the launch of the experiment.

It was found that only partial densities of hydrogen cyanide and phosgene reached their critical values. In this case, the partial density of hydrogen cyanide exceeded its critical value by 2.5 times, and that of phosgene by 17 times. Therefore, it is necessary to calculate the time for blocking evacuation routes for hydrogen cyanide and phosgene to determine fire risks in children's play areas.

Conclusions. When stuffed children's toys are in combustion, highly toxic gases as carbon monoxide, hydrogen cyanide and phosgene are released in concentrations dangerous to human life and health. This fact must be taken into account when fire risks in children's play areas are analyzed.

Keywords: fire; hydrogen cyanide; carbon monoxide; phosgene; partial density; toxicity; critical concentration

For citation: Puzach S.V., Bachurin D.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Balaev A.A. Generation of toxic gases during combustion of stuffed toys in multifunction shopping malls. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):41-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50 (rus).

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

Введение

Многофункциональные торгово-развлекательные комплексы представляют собой сложные объекты, пожарная безопасность которых должна соответствовать существующим нормам и правилам. Работа вышеуказанных объектов общественного назначения связана с постоянным потоком посетителей разных возрастов и социальных групп, наличием торговых и развлекательных зон [1–3].

С учетом тенденции развития социальной доступности торгово-развлекательных комплексов размещение развлекательных зон в общем объеме здания, например детских развлекательных зон, в которых предусматривается большое количество облицовочных декоративных покрытий из пластика, наполнение бассейнов различными пластикатами и мягкими игрушками, а также батутные центры, имеющие значительную пожарную нагрузку в виде поролонового или синтетического наполнителя батутных матов, представляет большую пожарную опасность с точки зрения токсикологического воздействия на эвакуирующихся потенциально образующихся токсичных продуктов горения при сгорании вышеуказанных материалов [4, 5].

Мягкие детские игрушки (рис. 1), находящиеся в детских развлекательных зонах, являются одним из наиболее опасных горючих материалов. В соответствии с положениями технического регламента Таможенного союза ТР ТС 008/2011 «О безопасно-

сти игрушек» с Изменениями на 17 марта 2017 года мягконабивные игрушки, а также игрушки, в которых может разместиться ребенок, должны быть пожаробезопасными. Помимо этого, при использовании игрушки необходимо свести к минимуму риск ущерба здоровью вследствие попадания химических веществ в дыхательные пути, на кожу, слизистые оболочки, глаза или желудок.

Данные о пожароопасных свойствах и термодинамических параметрах различной пожарной нагрузки представлены в базе данных типовой пожарной нагрузки [6], которая не включает в себя свойства и параметры мягких игрушек. Это свя-



Рис. 1. Мягкие детские игрушки

Fig. 1. Stuffed toys

зано с отсутствием обширной экспериментально-теоретической базы, описывающей их поведение в условиях пожара, а также качественный и количественный состав образующихся токсичных газов. Помимо этого, база данных представляет параметры по образованию лишь двух токсичных газов (CO , HCl), что не в полной мере описывает реальную токсикологическую картину пожара при сгорании полимерных материалов. В результате анализа литературных источников, описывающих поведение отдельных компонентов мягких игрушек (поролон и наполнитель) [5, 7–11], были выявлены основные потенциально образующиеся токсичные газы: монооксид углерода, циановодород, фосген и акролеин. Токсикологическое воздействие данных токсикантов, как правило, происходит при малых концентрациях, образование которых характерно для начальной стадии развития пожара и проведения эвакуации¹ [12–14]. Так, отсутствие экспериментально-теоретических данных о поведении мягких игрушек в условиях пожара может привести к серьезной недооценке пожарной опасности объектов, включающих в себя торговоразвлекательные зоны. Помимо этого, отсутствие экспериментально-теоретических данных не позволяет провести расчет времени блокирования путей эвакуации при пожарах в детских игровых зонах. Поэтому задача определения экспериментальных данных, описывающих поведение мягких игрушек в условиях пожара, является актуальной.

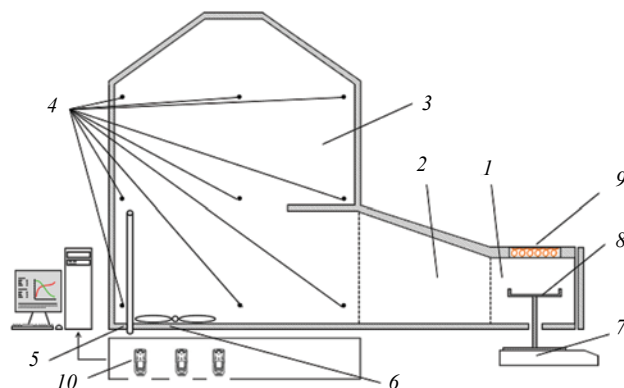


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — термопары; 5 — зонд отбора газа; 6 — вентилятор; 7 — электронные весы; 8 — держатель образца; 9 — электронагревательный элемент; 10 — газоаналитическое оборудование [15–17]

Fig. 2. Experimental unit design: 1 — combustion chamber; 2 — transition sleeve; 3 — exposure camera; 4 — thermocouples; 5 — gas sampling probe; 6 — fan; 7 — electronic scales; 8 — specimen holder; 9 — electric heating element; 10 — gas analysis equipment [15–17]

¹ 92B. Standard for smoke management systems in malls, Atria, and large spaces. Quincy, Massachusetts : NFPA, 2009. 65 p.

Целью работы является определение удельных коэффициентов образования и парциальной плотности токсичных газов, образующихся при сгорании мягких игрушек.

Для достижения цели:

- была проведена модернизация малогабаритной экспериментальной установки, позволяющей дополнительно измерять концентрацию диоксида азота и фосгена;
- проведены экспериментальные исследования по определению качественного и количественного состава токсичных продуктов горения при сгорании образцов мягких игрушек в опытной установке.

Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Экспериментальные исследования были проведены на модифицированной экспериментальной установке «Установка для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов» [14–16]. Модификации подверглась система контроля газовоздушной среды, которая позволяет оценивать количественный состав диоксида азота и фосгена в экспозиционной камере установки. Эксперименты заключались в исследовании термического разложения подготовленных образцов мягких игрушек в камере сгорания с последующей оценкой массовой скорости выгорания и образующихся концентраций продуктов горения.

Схема экспериментальной установки, представленной в работах [14–16], отображена на рис. 2. На рис. 3 дан внешний вид экспериментальной установки.

Процесс термического разложения исследуемых образцов инициировался посредством реализации падающего теплового потока на поверхность образцов в камере сгорания 1. Падающий тепловой поток реализовывался посредством работы экранированной термостатируемой радиационной панели с датчиком непрерывного контроля температуры 9. Схема камеры сгорания представлена на рис. 4. Контроль над плотностью падающего теплового потока осуществлялся с помощью водоохлаждаемого датчика Гордона и регистрирующего прибора с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ.

В ходе термического разложения материала образующиеся продукты горения поступали через теплоизолированный переходной рукав 2 в камеру экспозиции 3, где осуществлялся отбор проб газовой смеси газоаналитическим оборудованием 10 через зонд отбора проб газа 5.

Регистрация концентрации токсичных продуктов горения осуществлялась посредством работы



Рис. 3. Общий вид установки для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении
Fig. 3. General view of the experimental unit used to determine the fire hazard of substances and materials in the process of thermal decomposition

многоканальных газоанализаторов, определяющих концентрации следующих газов:

- диоксид углерода (CO_2) с диапазоном измерений от 0 до 5 % об.;
- монооксид углерода (CO) с диапазоном измерений от 0 до 1 % об.;
- циановодород (HCN) с диапазоном измерений от 0 до 0,01 % об.;
- двуокись азота (NO_2) с диапазоном измерений от 0 до 0,01 % об.;
- фосген (COCl_2) с диапазоном измерений от 0 до 0,01 % об.

Изменения массы исследуемых образцов определялись с помощью электронных весов 7 марки AND GF-6100, имеющих погрешность измерений, не превышающую ± 1 мг.

Экспериментальные исследования начинались с запуска электронагревательного элемента до реализации плотности падающего теплового потока 60 кВт/м^2 . При установлении статичной величины плотности падающего теплового потока производится запуск регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков.

После установления заданной плотности падающего теплового потока и запуска регистрирующих программ подготовленный и предварительно взвешенный образец материала помещают в держатель для образцов δ , размещенный в камере сгорания.

С использованием полученных экспериментальных данных удельные коэффициенты образования

HCN (L_{HCN}), COCl_2 (L_{COCl_2}), CO (L_{CO}), NO_2 (L_{NO_2}), а также поглощения кислорода (L_{O_2}) рассчитываются по следующим выражениям [14, 16, 17]:

$$L_{\text{HCN}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{HCN}}}{d\tau}, \quad (1)$$

$$L_{\text{COCl}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{COCl}_2}}{d\tau}, \quad (2)$$

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}, \quad (3)$$

$$L_{\text{NO}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{NO}_2}}{d\tau}, \quad (4)$$

$$L_{\text{O}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau}, \quad (5)$$

где V — объем экспозиционной камеры, м^3 ;

Ψ — массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ;

ρ_{HCN} , ρ_{COCl_2} , ρ_{CO} , ρ_{NO_2} и ρ_{O_2} — соответственно среднееобъемная плотность HCN , COCl_2 , CO , NO_2 и O_2 в экспозиционной камере, кг/м^3 .

Исходные данные

В качестве исследуемых мягких игрушек взяты наиболее распространенные игрушки производства Китая (рис. 4), которые состоят из наполнителя и внешней оболочки (ткани).

Образцы для проведения экспериментов изготавливались трех вариантов: фрагменты игрушки (наполнитель + внешняя оболочка), отдельно наполнитель, отдельно внешняя оболочка.

При испытании отдельно внешней оболочки исследовалось два образца с первоначальной массой 10,6 и 10,9 г.

Критические значения парциальной плотности токсичных газов принимались равными: монооксид углерода $\rho_{\text{CO кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ и диоксид углерода $\rho_{\text{CO}_2 \text{ кр}} = 0,11 \text{ кг/м}^3$ в соответствии с нормативным документом² (далее СП 11.13130), циановодород $\rho_{\text{HCN кр}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ [15] и диоксид азота $\rho_{\text{NO}_2 \text{ кр}} = 3,76 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$ [18].

Критические значения парциальной плотности фосгена представлены СП 11.13130 и составляют $\rho_{\text{COCl}_2 \text{ кр}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$. Однако при этой плотности фосгена при времени экспозиции 5 мин (в случае ингаляционного воздействия на человека в состоянии покоя) полученная доза является наименьшей опубликованной смертельной дозой³.

² СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. 18 с.

³ URL: <http://www.rhtop.ru/diagnoseassistant/Substance.aspx?id=94>



Рис. 4. Мягкие игрушки производства Китая, используемые в экспериментах

Fig. 4. China-made stuffed toys used in the experiments

В соответствии с положениями вышеуказанной работы при концентрации фосгена $\rho_{\text{COCl}_2 \text{ кр}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ и времени экспозиции 10 мин наблюдаются нарушения способности человека к передвижению. Нарушения способности человека к передвижению при небольших концентрациях фосгена могут значительно повлиять на процесс эвакуации людей.

Исходя из представленных положений, принимаем величину критической концентрации фосгена равной $\rho_{\text{COCl}_2 \text{ кр}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$, при которой наблюдается характерный токсикологический эффект, приводящий к нарушению способности передвижения человека.

Результаты экспериментов и их анализ

Фотографии образцов до и после проведения экспериментов представлены на рис. 5 и 6.

Зависимости массовой скорости выгорания от времени проведения экспериментов представлены на рис. 7.

Из рис. 7, б видно, что наполнитель теряет массу медленно в течение 12 мин. Это объясняется тем, что происходит термодеструкция наполнителя без пламенного горения. При этом выделения токсичных газов нет.

Зависимости среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода, циановодорода, фосгена и двуоксида азота от времени проведения эксперимента представлены на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что только парциальные плотности циановодорода и фосгена достигают своих критических значений. При этом парциальная плотность HCN превышает ее критическую величину в 2,5 раза, а фосгена — в 17 раз.

Зависимости удельных массовых коэффициентов образования вышеуказанных газов от времени проведения эксперимента приведены на рис. 9.

Средние значения удельных массовых коэффициентов образования токсичных газов равны: $L_{\text{CO}} = 0,034$; $L_{\text{HCN}} = 0,00135$; $L_{\text{COCl}_2 \text{ кр}} = 0,002$; $L_{\text{NO}_2} = 0,0125$.

Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретический анализ о потенциально образующихся токсичных веществах при горении мягких игрушек. Исходя из полученных количественных данных по образованию концентрации токсичных веществ, в частности циановодорода и фосгена, стоит отметить необходимость учета вышеуказанных токсичных веществ в рамках определения времени блокирования путей эва-



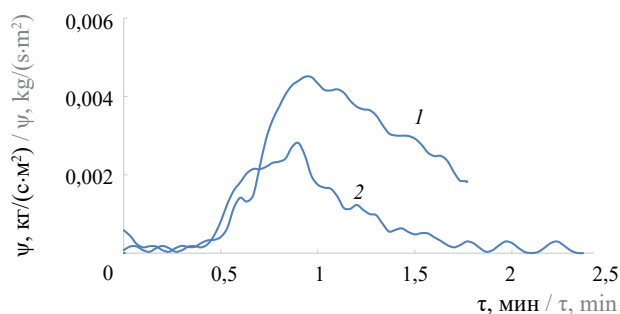
Рис. 5. Образец внешней оболочки до и после испытаний

Fig. 5. The specimen of the outer shell before and after the testing procedure

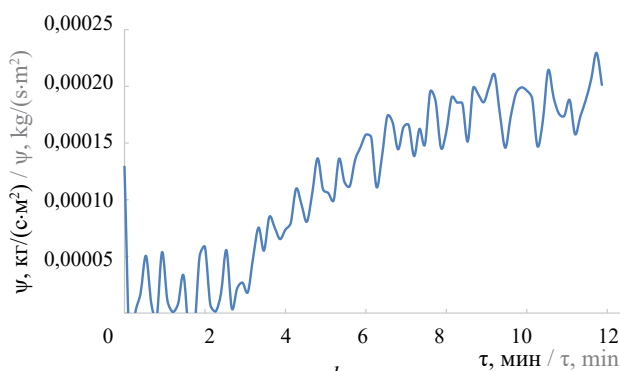


Рис. 6. Образец наполнителя до и после испытаний

Fig. 6. Stuffed toy filling before and after the testing procedure



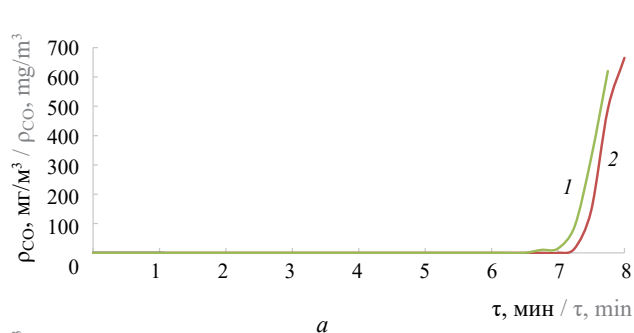
a



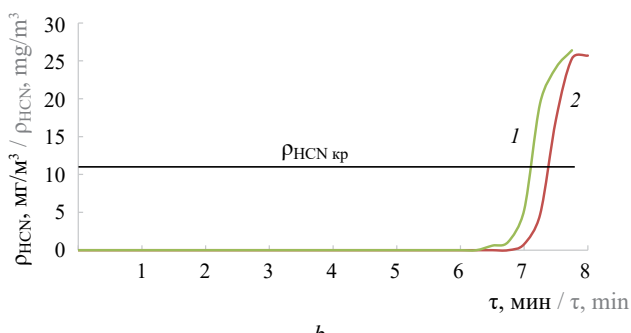
b

Рис. 7. Зависимости удельной массовой скорости выгорания отдельно внешней оболочки (a) и отдельно наполнителя (b) от времени горения; отдельно внешняя оболочка: 1 — эксперимент № 1; 2 — № 2

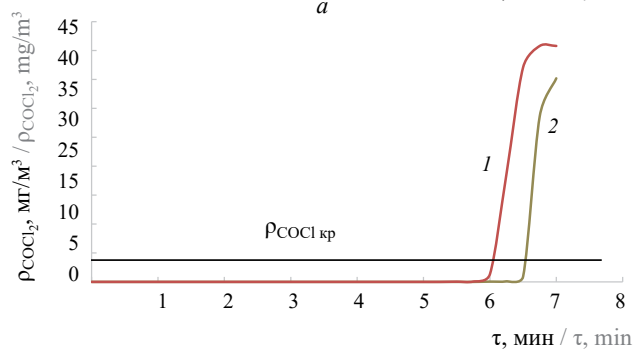
Fig. 7. Dependences between the specific mass burn-up rate of (a) the outer shell, (b) the filling and the combustion time. For the outer shell: 1 — Experiment 1; 2 — Experiment 2



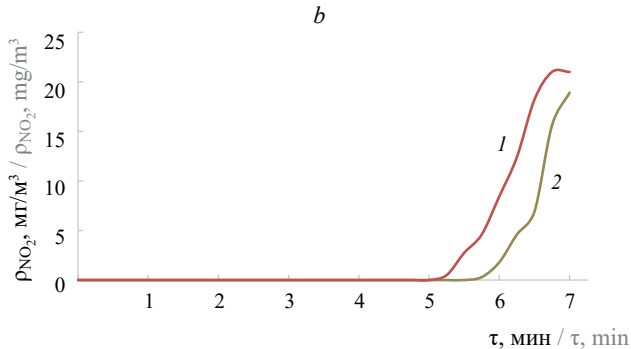
a



b



c



d

Рис. 8. Зависимости от времени с начала опытов среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода (a), циановодорода (b), фосгена (c) и двуоксида азота (d) при горении отдельно внешней оболочки: 1 — эксперимент № 1; 2 — № 2

Fig. 8. Dependences between the time from the beginning of the experiments and (a) the average volumetric partial density of carbon monoxide, (b) hydrogen cyanide, (c) phosgene, and (d) nitrogen dioxide during the combustion of the outer shell: 1 — Experiment 1; 2 — Experiment 2

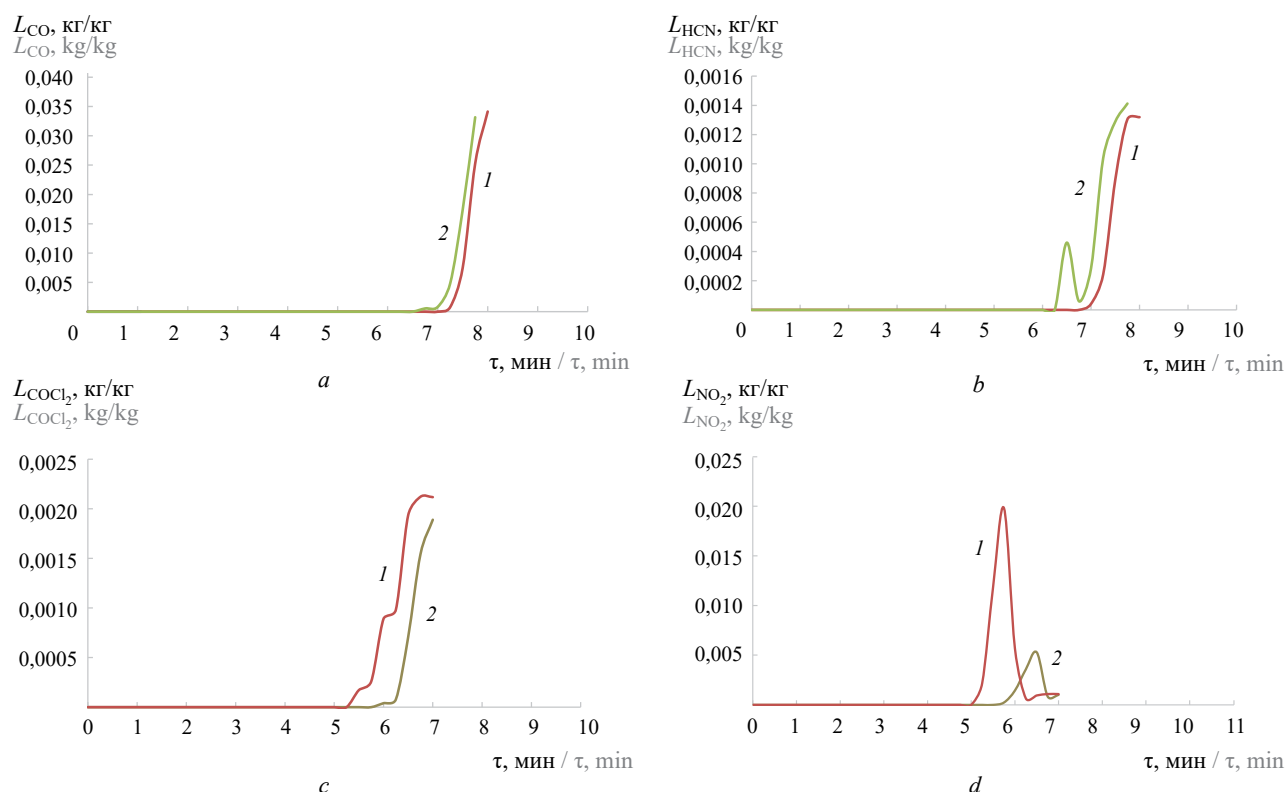


Рис. 9. Зависимости от времени с начала опытов удельных коэффициентов образования монооксида углерода (а), циановодорода (б), фосгена (с) и двуокиси азота (д) при горении отдельно внешней оболочки: 1 — эксперимент № 1; 2 — № 2

Fig. 9. Dependences between the time from the beginning of the experiments and specific coefficients of generation of (a) carbon monoxide, (b) hydrogen cyanide, (c) phosgene and (d) nitrogen dioxide during the combustion of the outer shell: 1 — Experiment 1; 2 — Experiment 2

куации при расчете величин пожарных рисков в развлекательно-торговых зонах и детских игровых зонах.

При исследовании образования и распространения фосгена также необходимо учесть, что фосген при температуре выше 300 °С при контакте с водой разлагается, образуя также токсичные газы (монооксид углерода и хлористый водород).

Выводы

При горении мягких детских игрушек выделяются в опасных для жизни и здоровья человека кон-

центрациях такие высокотоксичные газы, как монооксид углерода, циановодород и фосген. Образование данных высокотоксичных газов может привести к значительной недооценке пожарной опасности пожарной нагрузки торгово-развлекательных и детских игровых зон, в частности имеющих там мягких игрушек.

Полученные данные указывают на необходимость учета пожароопасных свойств мягких игрушек и газов, образующихся при их термическом разложении (циановодород, двуокись азота и фосген), при расчете пожарных рисков в детских игровых зонах и торговых помещениях, в которых размещаются мягкие игрушки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Присадков В.И., Мусликова С.В., Фадеев В.Е. К вопросу обеспечения пожарной безопасности торгово-развлекательных центров // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. Т. 1. № 34. С. 49–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42583541>
2. Hansen G.O., Morgan H.P. Design approaches for smoke control in atrium buildings. Building research establishraten report. CI/Sfb 981, 1994. 64 p.
3. Варнаков Д.В., Кузьминов А.В., Калинин В.Ю. Особенности обеспечения пожарной безопасности в торговых центрах // Modern Science. 2020. № 3. С. 212–215. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42622012>
4. Иличкин В.С., Фукалова А.А. Токсичность продуктов горения полимерных материалов : обзорная информация. М. : ГИЦ, 1987. 68 с.
5. Kaplan H.L., Hartzell G.E. Modeling of toxicological effects of fire gases: I. Incapacitation effects of narcotic fire gases // Journal of Fire Sciences. 1984. Vol. 2. Pp. 286–305.

6. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С., Нгуен Тхань Хай. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МВД России, 2021. 148 с.
7. Исаева Л.К. Экологические последствия пожаров. М. : ВПТШ МВД СССР, 1990. 107 с.
8. Babrauskas V. A comparative examination of the fire performance of pipe insulation // *Process Safety Progress*. 1996. Vol. 15. Issue 2. Pp. 114–120. DOI: 10.1002/prs.680150213
9. Jakobsen J., Babigumira R., Danielsen M., Grimsrud T.K., Olsen R., Rosting C. et al. Work conditions and practices in Norwegian fire departments from 1950 until today: a survey on factors potentially influencing carcinogen exposure // *Safety and Health at Work*. 2020. Vol. 11. Issue 4. Pp. 509–516. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.07.004
10. Wang S., Huang D., Guo C., Yuan Q., Chen Y., Lin P., Duan P. Bottom fire behaviour of thermally thick natural rubber latex foam // *E-Polymers*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 9–14. DOI: 10.1515/epoly-2019-0002
11. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б., Акперов Р.Г. О необходимости учета совместного воздействия токсичных продуктов горения при определении времени блокирования путей эвакуации // Ройтманские чтения : сб. мат. 10 науч.-практ. конф. (г. Москва, 26 мая 2022 года). М., 2022. С. 96–99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48646583>
12. Giebutowicz J., Rużycka M., Wroczyński P., Purser D.A., Stec A. Analysis of fire deaths in Poland and influence of smoke toxicity // *Forensic Science International*. 2017. Vol. 277. Pp. 77–87. DOI: 10.1016/j.forsciint.2017.05.018
13. Pauluhn J. Phosgene inhalation toxicity: Update on mechanisms and mechanism-based treatment strategies // *Toxicology*. 2021. Vol. 450. P. 152682. DOI: 10.1016/j.tox.2021.152682
14. Болдрушкиев О.Б., Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода при пожаре в помещении // *Безопасность жизнедеятельности*. 2019. № 10. С. 31–36.
15. Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. Влияние плотности падающего теплового потока на дымообразующую способность образца современной кабельной продукции // *Пожары и ЧС: предотвращение и ликвидация*. 2021. № 1. С. 24–33. DOI: 10.25257/FE.2021.1.24-33
16. Пузач С.В., Доан В.М., Нгуен Т.Д., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении : монография / под ред. С.В. Пузача. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. 130 с.
17. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
18. Кузьмин В.В., Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Ващенко Я.Ю. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования диоксида азота при горении нитроцеллюлозной киноплёнки // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2022. № 3. С. 5–9.

REFERENCES

1. Prasadkov V.I., Muslakova S.V., Fadeev V.E. With regard to shopping malls fire safety. *The Journal Modern Problems of Civil Protection*. 2020; 1(34):49-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42583541> (rus).
2. Hansenand G.O., Morgan H.P. *Design approaches for smoke control in atrium buildings. Building research establishraten report*. CI/Sfb 981, 1994; 64.
3. Varnakov D.V., Kuz'minov A.V., Kalinin V.Yu. Features of fire safety in shopping centers. *Modern Science*. 2020; 3:212-215. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42622012> (rus).
4. Ilichkin V.S., Phukalova A.A. *Toxicity of combustion products of polymeric materials : Overview*. Moscow, GIC Publ., 1987; 68. (rus).
5. Kaplan H.L., Hartzell G.E. Modeling of toxicological effects of fire gases: I. Incapacitation effects of narcotic fire gases. *Journal of Fire Sciences*. 1984; 2:286-305.
6. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Nguen Than Hai. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2021; 148. (rus).
7. Isaeva L.K. *Ecological consequences of fires*. Moscow, VIPTSH MVD SSSR, 1990; 107. (rus).
8. Babrauskas V. A comparative examination of the fire performance of pipe insulation. *Process Safety Progress*. 1996; 15(2):114-120. DOI: 10.1002/prs.680150213
9. Jakobsen J., Babigumira R., Danielsen M., Grimsrud T.K., Olsen R., Rosting C. et al. Work conditions and practices in Norwegian fire departments from 1950 until today: a survey on factors potentially influencing carcinogen exposure. *Safety and Health at Work*. 2020; 11(4):509-516. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.07.004
10. Wang S., Huang D., Guo C., Yuan Q., Chen Y., Lin P., Duan P. Bottom fire behaviour of thermally thick natural rubber latex foam. *E-Polymers*. 2019; 19(1):9-14. DOI: 10.1515/epoly-2019-0002
11. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Akperov R.G. On the need to take into account the combined effects of toxic combustion products when determining the time of blocking escape routes. *Rojtmanskije chteniya : Collection of Materials of the 10th Scientific*

- Practical Conference (Moscow, May 26, 2022).* Moscow, 2022; 96-99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48646583> (rus).
12. Giebułtowiec J., Rużycka M., Wroczyński P., Purser D.A., Stec A. Analysis of fire deaths in Poland and influence of smoke toxicity. *Forensic Science International*. 2017; 277:77-87. DOI: 10.1016/j.forsciint.2017.05.018
 13. Pauluhn J. Phosgene inhalation toxicity: Update on mechanisms and mechanism-based treatment strategies. *Toxicology*. 2021; 450:152682. DOI: 10.1016/j.tox.2021.152682
 14. Boldrushkiev O.B., Puzach S.V., Sulejkin E.V. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide at the fire indoors. *Life safety*. 2019; 10:31-36. (rus).
 15. Mustafin V.M., Puzach S.V., Akperov R.G. The effect of the heat flow falling on the surface of the modern cable products on their smoke-forming capacity. *Fires and Emergencies: Prevention and Liquidation*. 2021; 1:24-33. DOI: 10.25257/FE.2021.1.24-33 (rus).
 16. Puzach S.V., Doan V.M., Nguen T.D., Sulejkin E.V., Akperov R.G. *Formation, distribution and human exposure to toxic combustion products during a fire in a room*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017; 130. (rus).
 17. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005; 336. (rus).
 18. Kuz'min V.V., Puzach S.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Vashchenkova Ya.Yu. Experimental determination of the specific coefficient of nitrogen dioxide formation during the combustion of nitrocellulose film. *Fires and Emergencies: Prevention and Liquidation*. 2022; 3:5-9. (rus).

Поступила 17.11.2022, после доработки 15.12.2022;

принята к публикации 09.01.2023

Received November 17, 2022; Received in revised form December 15, 2022;

Accepted January 9, 2023

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

БАЧУРИН Дмитрий Валерьевич, главный инженер, НПО «Инженерные решения», Россия, 107113, г. Москва, Сокольническая слободка, 16, оф. 42; ORCID: 0000-0001-8461-6598; e-mail: dmi1694@ya.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

БОЛДРУШКИЕВ Очир Баатрович, старший инженер-программист научно-исследовательского отдела проблем профилактики объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Dmitriy V. BACHURIN, Chief Engineer, NPO Engineering Solutions, Sokolnicheskaya Slobodka, 16, of. 42, Moscow, 107113, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8461-6598; e-mail: dmi1694@ya.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Ochir B. BOLDRUSHKIEV, Senior Software Engineer of the Research Department of Problems of Prevention of Objects of Protection, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru

БАЛАЕВ Александр Александрович, начальник караула, 6-я Пожарно-спасательная часть 1-го Пожарно-спасательного отряда Федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по Калужской области, Россия, 248021, г. Калуга, ул. Московская, 249, ORCID: 0000-0001-7399-4390; e-mail: balaev.sahka97@gmail.com

Вклад авторов:

Пузач С.В. — идея, сбор материала, разработка методики и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Бачурин Д.В. — сбор материала, разработка методики и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи.

Акперов Р.Г. — анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Болдрушкиев О.Б. — разработка методики и проведение эксперимента; получение и обработка экспериментальных данных.

Балаев А.А. — проведение эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Alexander A. BALAEV, Head of Guard, 6th Fire and Rescue Unit of the 1st Fire and Rescue Squad of the Federal Fire Service of the State Fire Service of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Kaluga Region, Moskovskaya St., 249, Kaluga, 248021, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7399-4390; e-mail: balaev.sahka97@gmail.com

Contribution of the authors:

Sergey V. Puzach — idea, collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of article, scientific editing of text.

Dmitriy V. Bachurin — collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of an article.

Ruslan G. Akperov — analyzing experimental data, writing an article, scientific editing of the text.

Ochir B. Boldrushkiev — development of the procedure and conduct of the experiment; obtaining and processing experimental data.

Alexander A. Balaev — conduct of the experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 1. С. 51–56
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(1):51-56

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56>

Взрывоопасность аэровзвеси сухой молочной сыворотки

Николай Львович Полетаев ✉

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. В нормативной литературе многих стран принято относить фракцию горючей пыли с размером частиц более 500 мкм к дисперсным материалам, невзрывоопасным в состоянии аэровзвеси. Представляет интерес изучение взрывоопасности аэровзвесей, которые не подчиняются данному правилу. В частности, известна взрывоопасность образцов сухой молочной сыворотки (далее — сыворотки) со средним размером частиц 41, 162 и 750 мкм, выявленная испытаниями в камере объемом 1 м³. Поставлена задача определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки d_{cr} с помощью ранее разработанной процедуры и продемонстрировать нарушение упомянутого выше правила.

Метод обработки экспериментальных данных. Для упомянутых трех образцов сыворотки с известными значениями бедного концентрационного предела взрываемости (НКПР₁ = 250 г/м³, НКПР₂ = 250 г/м³ и НКПР₃ = 500 г/м³) построены непрерывные функции F распределения частиц по размерам d . Полученные функции $F_1(d)$, $F_2(d)$ и $F_3(d)$ соответственно представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

Оценка d_{cr} . Следуя известной процедуре (Полетаев, 2014), использовали информацию о первом и третьем образцах сыворотки. Находили значения d_{cr} из уравнения $F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1$. Решение уравнения дает $d_{cr} = 750$ мкм.

Обсуждение результатов. Полученная оценка d_{cr} намного превышает предельное значение параметра, предлагаемое в нормах. Данная оценка носит объективный характер и не может объясняться известным из практики измельчением крупных частиц в процессе распыления. В пользу последнего утверждения свидетельствует характерное снижение индекса взрывоопасности сыворотки с ростом среднего размера частиц рассмотренных трех образцов.

Выводы. Максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки составляет величину порядка 750 мкм.

Ключевые слова: порошок сыворотки; крупнодисперсная пыль; взрыв пыли; 1-м³ камера; взрывоопасная фракция

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Взрывоопасность аэровзвеси сухой молочной сыворотки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 51–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56

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

Explosion hazard of whey powder mixed with air

Nikolay L. Poletaev ✉

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. In many countries, regulations consider combustible dust with a particle size of more than 500 μm as dispersed material non-explosive if mixed with air. The explosiveness of mixtures of air and some substance arouses researchers' interest. In particular, the explosiveness of whey powder specimens (hereinafter referred to as whey powder) with an average particle size of 41, 162 and 750 μm, was identified in the process of their testing in a 1 m³ chamber. The task is to find out the maximum particle size of whey powder d_{cr} using the earlier developed procedure and to demonstrate its failure to conform to the rule specified above.

Method to process experimental data. Continuous functions F of particle size distribution d were constructed for three whey powder specimens having the following values of the lower explosive limit (LEL₁ = 250 g/m³, LEL₂ = 250 g/m³ and LEL₃ = 500 g/m³, respectively). Resulting functions $F_1(d)$, $F_2(d)$ and $F_3(d)$ were presented using Rosin – Rammler distributions that filled the gaps between the discrete data obtained as a result of the sieve analysis.

d_{cr} evaluation. We used information about the first and third whey powder specimens in compliance with the well-known procedure (Poletaev, 2014). d_{cr} values were identified using equation $F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = LEL_3/LEL_1$. Having solved the equation, we found that $d_{cr} = 750 \mu\text{m}$.

Discussion. The obtained evaluation of d_{cr} is much higher than the limit value of the parameter proposed in the regulations. This evaluation is of objective origin, and it cannot be explained by the grinding of large particles during the spraying process. The latter statement is supported by a characteristic decrease in the explosibility index of whey powder and an increase in the average particle size (for explosive fractions) of the three specimens in question.

Conclusions. The maximum particle size of the explosive whey fraction is about $750 \mu\text{m}$.

Keywords: whey powder; coarse dust; dust explosion; 1 m^3 chamber; explosive fraction

For citation: Poletaev N.L. Explosion hazard of whey powder mixed with air. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):51-56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56 (rus).

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

Введение

Известно, что проявление взрывоопасности мелко-дисперсным горючим материалом в состоянии аэровзвеси возможно лишь при достаточно малом размере частиц этого материала [1, 2]. Данное обстоятельство учитывается в нормативной литературе Канады¹, России², США^{3, 4} и многих других стран в виде правила, согласно которому допускается относить фракцию горючей пыли с размером частиц более $500 \mu\text{m}$ к дисперсным материалам, невзрывоопасным в состоянии аэровзвеси. Действительно, многие исследования показали, что горючие пыли могут быть взрывобезопасны уже с размера, превышающего $30 \dots 100 \mu\text{m}$ [3–7].

В то же время представляет интерес изучение взрывоопасности аэровзвесей, которые не подчиняются указанному правилу. В частности, известна взрывоопасность фракций образцов сухой молочной сыворотки (далее — сыворотки) со средним размером частиц 41 , 162 и $750 \mu\text{m}$, выявленная испытаниями в камере объемом 1 m^3 . Поставлена задача определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки d_{cr} с помощью ранее разработанной процедуры [3, 8] и продемонстрировать нарушение упомянутого выше правила.

Во избежание недоразумений, связанных с разнообразием форм частиц, предполагается, что рассматриваемые здесь и далее дисперсные материалы состоят из частиц, которые можно характеризовать единственным габаритным размером. Допускается, что приближенный характер такого подхода не окажет существенного влияния на результаты данного исследования.

¹ CSA C22.1–2021. The Canadian Electrical Code (CE Code): 2021.

² ГОСТ ISO/IEC 80079-20-2–2017. Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли.

³ NFPA 499 (2021). Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas. Current Edition: 2021.

⁴ NFPA 70. National Electrical Code, Current Edition: 2020.

Метод обработки экспериментальных данных

Использование процедуры [3] предполагает наличие не менее двух полидисперсных образцов исследуемой пыли с существенно отличными распределениями частиц по размерам $F(d)$ и различными значениями НКПР. Под $F(d)$ понимается массовая доля частиц, имеющих размер менее d .

Согласно [9], для упомянутых выше трех полидисперсных образцов сыворотки имеются известные данные дискретного ситового анализа и показатели взрыва в 1-m^3 камере, которые представлены в табл. 1 и 2 соответственно, где d_{50} — медианный размер частицы, определяемый условием $F(d_{50}) = 0,5$; P_{max} — максимальное давление взрыва, кПа; $(dP/dt)_{\text{max}}$ — максимальная скорость нарастания давления взрыва, бар/с; $1 \text{ бар} = 100 \text{ кПа}$.

Таблица 1. Данные, % масс., ситового анализа образцов сыворотки [9]

Table 1. Data, wt %, on the sieve analysis of whey powder specimens [9]

Номер образца Specimen No.	< 20 мкм < 20 mm	< 32 мкм < 32 mm	< 71 мкм < 71 mm	< 125 мкм < 125 mm	< 500 мкм < 500 mm	d_{50} , мкм d_{50} , mm
1	13	35	73	–	–	41
2	–	–	20	40	–	152
3	–	–	8	16	40	750

Таблица 2. Показатели взрыва образцов сыворотки

Table 2. Explosion parameters of whey powder specimens

Номер образца Specimen No.	НКПР, г/м ³ LEL , g/m ³	P_{max} , кПа P_{max} , kPa	$(dP/dt)_{\text{max}}$, бар/с $(dP/dt)_{\text{max}}$, bar/s	d_{50}^* , мкм d_{50}^* , μm
1	125	9,8	140	41
2	125	7,4	41	152
3	250	5,8	27	250

Поскольку значения НКПР первых двух образцов совпадают, для оценки d_{cr} будет использоваться только один из этих образцов совместно с третьим. Для определенности это будут первый и третий образцы. Как увидим из дальнейшего изложения, результат оценки d_{cr} останется неизменным, если в упомянутой паре произвести замену первого образца на второй.

Необходимые для последующего анализа непрерывные функции распределения частиц образцов по размерам моделировались следующим образом. Функция $F(d)$ на отрезке оси d между соседними аргументами, для которых величина F известна по результатам ситового анализа, представляется распределением Розина – Раммлера [10]:

$$F(d) = 1 - [1 - F(d_1)]^B,$$

где $B = (d/d_1)^{G_k}$;

G_k — крутизна функции распределения;

$$G_k = \frac{\ln\left(\frac{\ln[1 - F(d_2)]}{\ln[1 - F(d_1)]}\right)}{\ln(d_2/d_1)};$$

$F(d_1), F(d_2)$ — известные значения функции распределения на концах рассматриваемого отрезка d_1 и d_2 ;

индекс k принимает значение от 1 до 4, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси d в следующем перечне отрезков: от 20 до 32 мкм, от 32 до 71 мкм, от 71 до 125 мкм, от 125 до 500 мкм.

В табл. 3 приводятся значения параметра G_k .

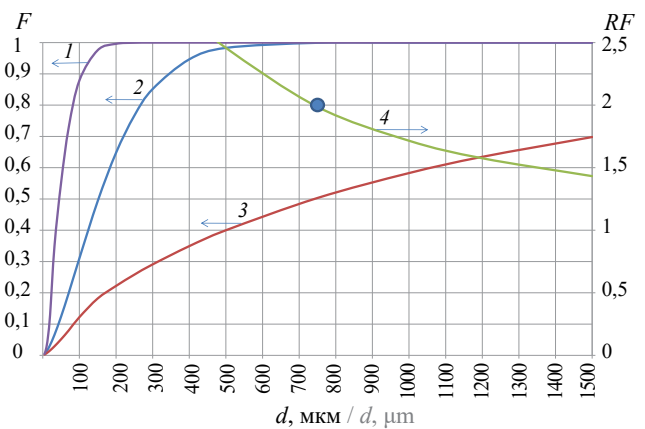
Полученные кусочно-гладкие и непрерывные функции распределения F_1, F_2 и F_3 представлены на рисунке.

Оценка d_{cr}

Согласно построению процедуры [3], оценка параметра d_{cr} использует следующие три предположения о закономерностях горения пыли заданного химического состава. НКПР полидисперсной пыли обратно пропорционален полноте выгорания пыли вблизи НКПР [11]. Зависимость полноты выгорания

Таблица 3. Результаты обработки данных табл. 1
Table 3. Table 1 data processing results

Номер образца Specimen No.	G_k			
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	2,403	1,395	—	—
2	—	—	1,489	—
3	—	—	1,30412	0,77541



Функции распределения F_1 (1), F_2 (2) и F_3 (3) частиц сыворотки по размерам d и отношение $RF = F_1/F_3$ (4). Жирной точкой на кривой 4 отмечен случай $RF = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1 = 2$, который отвечает $d_{cr} = 750$ мкм

Functions F_1 (1), F_2 (2) and F_3 (3) showing whey powder particles distribution by size d and their ratios $RF = F_1/F_3$ (4). The bullet point on curve 4 marks the case $RF = \text{LEL}_3/\text{LEL}_1 = 2$, which corresponds to $d_{cr} = 750$ μm

Z монодисперсной фракции пыли от размера частиц d вблизи НКПР близка к одноступенчатой функции (см., например, [12]) и может быть представлена в виде: $Z = 1$, если $d \leq d_{cr}$; $Z = 0$, если $d > d_{cr}$. Для оценки НКПР полидисперсной пыли, рассматриваемой в виде смеси пылей, представляющих монодисперсные фракции, можно использовать правило Ле Шателье [12].

В рамках используемых предположений d_{cr} для сыворотки находят из геометрически наглядного решения уравнения:

$$F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1 = 2.$$

Согласно представленной на рисунке графической информации, имеем для сыворотки $d_{cr} = 750$ мкм. К аналогичному результату приводит использование информации о втором и третьем образцах сыворотки.

Обсуждение результатов

Полученная оценка $d_{cr} = 750$ мкм намного превышает предельное значение параметра, предлагаемое в нормах (до 500 мкм). Тем не менее отметим, что в научной литературе можно встретить результаты исследования дисперсных материалов, для которых зафиксированы еще большие значения рассматриваемого параметра [9].

При этом не все высокие значения $d_{cr} > 500$ мкм подтверждаются средствами объективного контроля. Основной причиной несоответствия измеряемых и фактических значений d_{cr} является измельчение тестируемого дисперсного материала в процессе распыления во взрывной камере, что отмечается многими исследователями [13–19]. Например,

в работе [13] при исследовании порошка серы в 20-литровой камере регистрировалась взрывоопасность фракций серы с размером частиц, достигающим 2000 мкм. Авторы [13] отметили слабое влияние дисперсности порошка серы на величину НКПР аэровзвеси. Вследствие этого возникло предположение об измельчении крупных частиц серы в процессе распыления порошка серы во взрывной камере, которое подтвердилось прямыми измерениями дисперсности распыленного образца (в отсутствие зажигания).

При исследовании сыворотки в настоящей работе можно исключить существенное измельчение образца, поскольку в отличие от описанного выше случая с серой наблюдается резкое снижение взрывоопасности аэровзвеси (скорости нарастания давления взрыва $(dP/dt)_{\max}$) с ростом среднего размера взрывоопасной фракции частиц d_{50}^* . Значения

последнего приводятся в последнем столбце табл. 2. В отличие от среднемассового размера частиц d_{50} величина d_{50}^* характеризует средний размер частиц взрывоопасной фракции полидисперсного материала и, как показали расчеты [3, 4, 20], в большей степени соответствует использованию в качестве средней характеристики дисперсности. Метод ее определения приводится в [20].

Выводы

Рассмотрены известные данные о дисперсном составе и бедном пределе взрываемости трех полидисперсных образцов сухой молочной сыворотки. Данные обработаны согласно методике [3], выполнена оценка максимального размера частиц взрывоопасной фракции сыворотки, который составил 750 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Di Benedetto A., Russo P., Amyotte P., Marchand N. Modelling the effect of particle size on dust explosions // Chemical Engineering Science. 2010. Vol. 65. Issue 2. Pp. 772–779. DOI: 10.1016/j.ces.2009.09.029
2. Ichinose K., Mogi T., Dobashi R. Effects of the particle size and agglomeration on the minimum explosible concentration and flame propagation velocity in dust clouds // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2020. Vol. 56. Issue 4. Pp. 421–426. DOI: 10.1134/s001050822004005x
3. Полежаев Н.Л. Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэровзвеси // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26
4. Полежаев Н.Л. Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 5–11. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.5-11
5. Soundararajan R., Amyotte P.R., Pegg M.J. Explosibility hazard of iron sulphide dusts as a function of particle size // Journal of Hazardous Materials. 1996. Vol. 51. Issue 1–3. Pp. 225–239. DOI: 10.1016/s0304-3894(96)01825-0
6. Полежаев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21
7. Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors. EPRI, Palo Alto, CA, 2007. P. 1014797.
8. Poletaev N.L., Korolchenko A.Y. A now on the relationship between the lower explosibility limit of dust and particle size // Proceedings of the Joint Meeting of the Russian and Japanese Sections of the Combustion Institute. Chernogolovka, Moscow Region, 1993. Pp. 116–117.
9. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Staeben // SFT-Report. No. 2. Pp. 2–79. 100 S.
10. Козлов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
11. Selle H., Zehr J. Beurteilung der experimentelle werte für die untere zündgrenze von staub // Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen. Staub und Reinhalt Luft, 1954. Bd. 38. 583 S.
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. The industrial dust explosions / ed. K.L. Cashdollar, M. Hertzberg. ASTM Special Technical Publication 958. Philadelphia : ASTM, 1987. Pp. 5–32.
13. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
14. Bagaria P., Zhang J., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle breakage and size distribution in the minimum ignition energy apparatus // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.001
15. Sanchirico R., Di Sarli V., Russo P., Di Benedetto A. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests //

- Powder Technology. 2015. Vol. 279. Pp. 203–208. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.003
16. Bagaria P., Zhang J., Yang E., Dastidar A., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle integrity and explosion hazards // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 44. Pp. 424–432. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.001
 17. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion // *Powder Technology*. 2018. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
 18. Bagaria P., Hall B., Dastidar A., Mashuga C. Effect of particle size reduction due to dust dispersion on minimum ignition energy (MIE) // *Powder Technology*. 2019. Vol. 356. Pp. 304–309. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.030
 19. Miller J., Mulligan P., Johnson C.E. Commi-nution of pulverized Pittsburgh coal during ASTM E1226-12a dust combustibility testing // *Powder Technology*. 2020. Vol. 375. Pp. 28–32. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.059
 20. Поletaев Н.Л. Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 5. С. 6–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13

REFERENCES

1. Di Benedetto A., Russo P., Amyotte P., Marchand N. Modelling the effect of particle size on dust explosions. *Chemical Engineering Science*. 2010; 65(2):772–779. DOI: 10.1016/j.ces.2009.09.029
2. Ichinose K., Mogi T., Dobashi R. Effects of the particle size and agglomeration on the minimum explosible concentration and flame propagation velocity in dust clouds. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020; 56(4):421–426. DOI: 10.1134/s001050822004005x
3. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive monodisperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9): 15–26 (rus).
4. Poletaev N.L. Estimating the maximum size of explosive iron sulfide particles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3): 5–11. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.5-11 (rus).
5. Soundararajan R., Amyotte P.R., Pegg M.J. Explosibility hazard of iron sulphide dusts as a function of particle size. *Journal of Hazardous Materials*. 1996; 51(1-3): 225–239. DOI: 10.1016/s0304-3894(96)01825-0
6. Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21 (rus).
7. *Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors*. EPRI, Palo Alto, CA, 2007; 1014797.
8. Poletaev N.L., Korolchenko A.Y. A now on the relationship between the lower explosibility limit of dust and particle size. *Proceedings of the Joint Meeting of the Russian and Japanese Sections of the Combustion Institute*. Chernogolovka, Moscow Region, October 1993. Pp. 116–117.
9. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. *Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben*. SFT-Report. 2; 2-79:100. (ger).
10. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264.
11. Selle H., Zehr J. Beurteilung der Experimente Werte für die untere Zündgrenze von Staub. Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen. *Staub und Reinhalt Luft*. 1954; 38:583. (ger).
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. The Industrial dust explosions / ed. K.L. Cashdollar, M. Hertzberg. *ASTM Special Technical Publication 958*. Philadelphia, ASTM, 1987; 5–32.
13. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
14. Bagaria P., Zhang J., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle breakage and size distribution in the minimum ignition energy apparatus. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.001
15. Sanchirico R., Di Sarli V., Russo P., Di Benedetto A. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests. *Powder Technology*. 2015; 279:203–208. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.003
16. Bagaria P., Zhang J., Yang E., Dastidar A., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle integrity and explosion hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 44:42–432. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.001
17. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion. *Powder Technology*. 2018. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089

18. Bagaria P., Hall B., Dastidar A., Mashuga C. Effect of particle size reduction due to dust dispersion on minimum ignition energy (MIE). *Powder Technology*. 2019; 356:304-309. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.030
19. Miller J., Mulligan P., Johnson C.E. Comminution of pulverized Pittsburgh coal during ASTM E1226-12a dust combustibility testing. *Powder Technology*. 2020; 375:2-32. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.059
20. Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):6-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05. 6-13 (rus).

*Поступила 14.01.2023, после доработки 26.01.2023;
принята к публикации 31.01.2023*

*Received January 14, 2023; Received in revised form January 26, 2023;
Accepted January 31, 2023*

Информация об авторе

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

Information about the author

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 1. С. 57–68
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(1):57-68

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 336:763.336.275.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68>

Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор)

Николай Николаевич Брушлинский¹, Сергей Викторович Соколов¹✉,
Маргарита Петровна Григорьева¹, Петер Вагнер²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Пожарная академия города Берлина, г. Берлин, Германия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день в области обеспечения пожарной безопасности существует множество (более 150) различных математических моделей, которые призваны решать задачи теплотехники, тепло-массопереноса, движения людских потоков, динамики пожара в помещении и на открытых пространствах, а также определения параметров функционирования противопожарной службы. Системное исследование моделей в области пожарной безопасности было начато в 1970-е гг. и продолжается по сей день. В данной статье представлены результаты научного обобщения математических методов в области обеспечения пожарной безопасности и даны краткие исторические предпосылки их создания.

Цели и задачи. Научное обобщение основных математических моделей, применяемых для решения научно-технических задач в области обеспечения пожарной безопасности.

Методы. Методы системного анализа.

Результаты. В статье представлены результаты обзора разнообразных математических моделей в области обеспечения пожарной безопасности. Исследование охватило множество теорий в сфере пожарной безопасности (теории пожарной безопасности веществ и материалов, технологий, зданий и сооружений, огнестойкости строительных конструкций и зданий, профилактики пожаров, организации, функционирования и управления противопожарной службой и многое другое). Рассмотрены основные прикладные математические методы (аналитические, вероятностные, имитационные), содержащиеся в описанных теориях пожарной безопасности.

Обсуждение. В статье перечислены более 150 моделей пожаров разных типов и классов. В большинстве из них описываются процессы тепломассопереноса при пожарах, динамика пожаров, поведение веществ, материалов, строительных конструкций и прочее в условиях пожара. Также в исследовании уделено внимание вероятностным моделям теории функционирования экстренных и аварийно-спасательных служб.

Выводы. В настоящее время происходит формирование общей теории обеспечения пожарной безопасности, представляющей собой совокупность физико-химических, математических, экономико-математических и иных моделей возникновения, развития и ликвидации пожаров в зданиях и вне их в условиях применения пассивных и активных средств борьбы с ними.

Ключевые слова: математическая модель; методы системного анализа; вероятностный метод; имитационный метод; функционирование экстренных служб; пожарная опасность

Для цитирования: Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П., Вагнер П. Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 57–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68.

✉ Соколов Сергей Викторович, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Modeling in the field of fire safety (review)

Nikolay N. Bruslinskiy¹, Sergey V. Sokolov¹✉, Margarita P. Grigorieva¹, Peter Wagner²

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Fire Academy of Berlin, Berlin, Germany

ABSTRACT

Introduction. To date, there are many (over 150) different mathematical models developed in the field of fire safety. These models are designed to (1) solve problems of heat engineering, heat and mass transfer, human

flows, indoor and outdoor fire behaviour, and (2) determine parameters of operation of fire service departments. System research into fire safety models was initiated in the 1970s, and it has been conducted since then. This article presents the results of scientific generalization of mathematical methods of fire safety and provides a brief historical background of the issue.

Targets and goals. Scientific generalization of basic mathematical models used to solve research and engineering problems of fire safety.

Methods. Methods of systems analysis.

Results. The article presents the results of a review of various mathematical models of fire safety. The study encompasses many theories (theories of fire safety of substances and materials, technologies, buildings and structures, fire resistance of building structures and buildings, fire prevention, organization, operation and management of fire service departments, etc.). Principal mathematical methods (analytical and probabilistic ones, as well as simulation), employed by the above theories of fire safety, are considered.

Discussion. The authors list more than 150 fire models of different types and classes. Most of them deal with processes of heat and mass transfer during fires, the fire behaviour, the behavior of substances, materials, building structures, etc. on fire. The study also focuses on probabilistic models of the theory of emergency rescue services operation.

Conclusions. Currently, a general theory of fire safety is being developed. It is a combination of physicochemical, mathematical, economic-mathematical and other models describing the break-out, development and elimination of fires inside and outside of buildings in case of application of passive and active fire-fighting appliances.

Keywords: mathematical model; methods of systems analysis; probabilistic method; simulation method; emergency service activities; fire hazard

For citation: Bruslinskiy N.N., Sokolov S.V., Grigorieva M.P., Wagner P. Modeling in the field of fire safety (review). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):57-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.57-68 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Sokolov, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Возникновение пожарной опасности на Земле

Все люди знают о существовании пожарной опасности, т.е. о возникновении неуправляемых процессов горения (пожаров), приносящих большой вред человеку, обществу, окружающей среде.

Но пока нет серьезных исследований, изучающих историю возникновения пожарной опасности на планете. Анализ этой проблемы предполагает последовательное выяснение вопросов возникновения на Земле процессов горения, появления человека, его овладения огнем и, следовательно, возникновения пожаров, т.е. пожарной опасности.

Для дальнейшего анализа проблемы необходимо помнить, что горение — сложный физико-химический процесс взаимодействия горючего вещества и окислителя, характеризующийся выделением большого количества тепла и света. Для возникновения горения и развития процесса горения необходимо горючее вещество, окислитель и источник воспламенения. Обычно в качестве окислителя в этом процессе участвует кислород.

Следовательно, нужно выяснить, когда на Земле возникло горючее вещество, кислород и источники воспламенения (см. рисунок).

Земля возникла 4,7 млрд лет тому назад. Атмосфера (ее газовая оболочка) формировалась вместе с планетой и сначала состояла из углекислого газа, водорода, сероводорода, аммиака и метана (в основном, за счет вулканической активности). Кислорода в атмосфере не было.

Жизнь на Земле возникла в мировом океане 3,7 млрд лет назад в виде простейших организмов, которые в кислороде не нуждались.

Первые атомы кислорода появились только 2,4 млрд лет назад. Он производился океаном и полностью поглощался породами морского дна.

Только 0,54 млрд лет назад возник свободный кислород и стал накапливаться в атмосфере, постепенно достигнув уровня в 21 %.

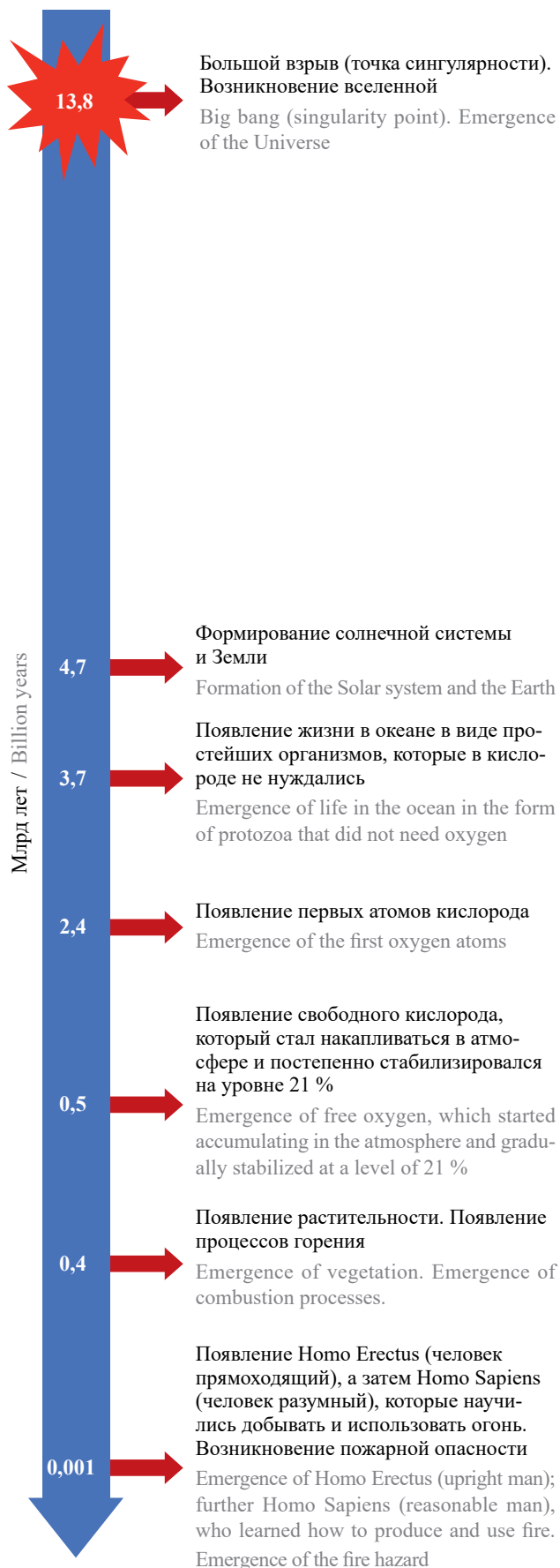
Примерно 0,4 млрд лет назад на Земле появилась растительность (не водоросли океана).

Следовательно, только 300–400 млн лет назад на Земле появилось горючее вещество, окислитель и источники зажигания (молнии, извержения вулканов, самовоспламенение), т.е. могли возникнуть процессы горения.

Примерно 1,5–2 млн лет назад появился *homo erectus* (человек прямоходящий), который научился использовать огонь. В результате раскопок археологов удалось установить, что примерно 1 млн лет назад *homo erectus* использовал огонь в своих пещерах для обогрева и приготовления пищи [1].

Примерно 300–350 тыс. лет назад появился *homo sapiens* (человек разумный), который уже добывал и полномасштабно использовал огонь в своих целях. Тогда и стали возникать пожары (см. определение выше) и возникла пожарная опасность.

Таким образом, процессы горения на Земле могли возникнуть 350–400 млн лет назад, а пожарная опасность (пожары) — примерно 300–350 тыс. лет назад.



Когда и как на Земле возникла пожарная опасность
When and how the fire danger emerged on the Earth

Понятие «пожар» как процесс неуправляемого горения, приносящего вред обществу и природе, возникло только после появления на Земле исторического человека.

Итак, с тех пор как человек научился использовать огонь для обогрева жилища, приготовления пищи, ремесленной деятельности и т.д., он стал осознавать не только пользу от использования огня, но и потенциальную опасность процесса горения, который мог приносить большой вред при неосторожном использовании.

Так возникла проблема борьбы с пожарной опасностью и обеспечения пожарной безопасности.

Научное обеспечение противодействия пожарной опасности

Искать средства защиты от пожарной опасности человечество стало сразу, как только начало страдать от пожаров.

Сначала проблема осмысливалась на эмпирическом уровне: создавался специальный очаг для огня; возникали противопожарные разрывы между деревянными зданиями; строили каменные дома; запасали воду для тушения пожаров; власти разрабатывали требования пожарной безопасности (Указ «О градском благочинии» царя Алексея Михайловича) и т.д.

Однако пытливые умы людей, склонных к размышлениям и научным исследованиям, уже в древнем мире начали думать, что такое горение, теплота, какова их физическая сущность.

В средние века возникли достаточно наивные теории флогистона, теплорода, более строгая механическая теория теплоты и прочее. Но все они, так или иначе, создавали основу для физико-химического понимания процессов горения, для создания основ теплофизики, для действительно научного понимания всех этих явлений. В это время появились понятия температуры, теплоемкости и другие. Но мир «благодаря» научно-техническому прогрессу становился все более пожароопасным. Появлялись новые пожароопасные материалы, технологии, сооружения.

В 1928 г. появилась теория цепных реакций (лауреат Нобелевской премии академик Н.Н. Семёнов), позволившая построить строгую теорию горения и взрыва на химико-физической основе. В это время начала формироваться специальная система наук о пожарной безопасности.

Необходимо было последовательно изучить и оценить пожарную опасность веществ, материалов, технологий, строительных конструкций, зданий, сооружений и научиться снижать риски ее проявления. Для этого нужно было разработать методы анализа пожарной опасности указанных объектов и средства обеспечения их пожарной без-

опасности (противопожарная пропитка, обмазка, повышение огнестойкости конструкций, объемно-планировочные решения, способствующие эвакуации людей, создание противопожарной сигнализации, противопожарной автоматики, пожарной техники и снаряжения и т.д.).

Так возникли и развивались теории пожарной безопасности веществ и материалов, технологий, зданий и сооружений, огнестойкости строительных конструкций и зданий, профилактики пожаров, экономики пожарной безопасности, пожарных рисков, организации, функционирования и управления противопожарной службой и многие другие.

Все эти теории основаны на физике, теплофизике, химии, химической физике, теоретической и строительной механике, сопротивлении материалов, гидравлике, психологии, экономике, математике и других современных научных дисциплинах.

Можно сказать, что в настоящее время происходит формирование общей теории обеспечения пожарной безопасности, представляющей собой совокупность физико-химических, математических, экономико-математических и иных моделей возникновения, развития и ликвидации пожаров в зданиях и вне их в условиях применения пассивных и активных средств борьбы с ними [2].

Моделирование пожаров

Чтобы реально оценить пожарные риски на том или ином объекте защиты и эффективно управлять ими для обеспечения пожарной безопасности объекта, необходимо с позиций современных научных представлений как можно глубже и детальнее познать закономерности возникновения, развития и ликвидации пожаров всех классов и типов. Именно для этого и нужны модели пожаров [3–8].

Начиная со второй половины XX в. все больше исследователей в разных странах (Россия, Швеция, Великобритания, США, Япония и др.) начали профессионально изучать пожары, их динамику, способы, методы и средства борьбы с ними, вопросы проектирования систем противопожарной защиты, организации и управления противопожарными службами и др.

Наука о пожаре, об обеспечении пожарной безопасности различных объектов, городов и территорий, заняла свое место среди других прикладных наук, носящих междисциплинарный характер. Сегодня трудно указать научную дисциплину, методы которой не использовались бы при решении проблем пожарной безопасности [2].

Чтобы проиллюстрировать это положение, дадим сначала словесное описание процесса возникновения и развития пожара в помещении. Это описание уже является простейшей моделью

пожара, которую называют вербальной (от латинского «verbalis» — словесный).

Предположим, что в каком-то помещении возник пожар. В помещении нарастает количество выделяющегося тепла, растет температура, появляются продукты горения (в частности, токсичные). Часть тепла рассеивается в окружающем пространстве. Другая часть аккумулируется горючими и негорючими материалами, находящимися в помещении. Из них состоят и строительные конструкции, и различные предметы, и оборудование.

Нагреваясь до определенной температуры, сгораемые конструкции, предметы и оборудование воспламеняются и горят, а несгораемые материалы и конструкции подвергаются термической деструкции, изменяют свойства, теряют механическую прочность и при определенных условиях разрушаются.

Пожар может распространиться в соседние помещения, охватить все здание, переброситься на соседние.

Чтобы минимизировать последствия пожара, необходимо как можно быстрее обнаружить его, принять меры к его ликвидации, обеспечить эвакуацию людей, животных, материальных и духовных ценностей [2].

Для того чтобы проанализировать все перечисленные явления и процессы, нужно использовать методы физики, химии, физической химии, химической физики, теплофизики, механики твердых тел, жидкостей и газов, сопротивления материалов, материаловедения, токсикологии, физиологии, психологии, социологии, экономики и, конечно, математики.

Только с помощью комплекса этих (и других) научных дисциплин можно изучить и описать все самые сложные явления и процессы, сопровождающие возникновение, развитие и ликвидацию пожара, т.е. смоделировать пожар, построить его модель [3].

Сущность всех модельных представлений о развитии пожаров в объектах различного назначения и разной природы заключается в том, чтобы знать в любой момент времени и в каждой точке данного объекта значения всех величин, характеризующих пожар (температуру, давление и концентрации газов и дыма, скорости газовых потоков и т.д.). Иными словами, нужно знать поля всех этих величин в любой момент времени. Эта информация необходима для решения вопросов о проектировании объектов, требуемой огнестойкости их конструкций, размещения и устройства различных датчиков, об устройстве автоматических систем пожаротушения, систем дымоудаления, о путях эвакуации людей, о дислокации пожарных подразделений и многих других, связанных

с предупреждением пожаров и эффективной борьбой с ними в тех или иных объектах.

При построении моделей развития пожара в здании важнейшим вопросом является точность метода расчета тепломассообмена при пожарах. Сложность разработки такого метода заключается в многофакторности и нелинейности проблемы. Реальный пожар как неуправляемое горение является сложным, недостаточно изученным, нестационарным, трехмерным теплофизическим процессом, сопровождающимся изменением химического состава и параметров газовой среды.

Турбулентный конвективный и лучистый тепломассообмен в очаге горения с химическими реакциями, теплообмен между горячими газами и ограждающими конструкциями помещения и прочее осложняются тепломассообменом с окружающей средой через проемы и вследствие работы систем механической приточно-вытяжной вентиляции и пожаротушения, что приводит к принципиальной неоднородности температурных, скоростных и концентрационных полей продуктов горения в объеме помещения.

О сложности решения этой проблемы говорит, в частности, тот факт, что математическое моделирование турбулентного тепломассообмена в сложных термогазодинамических условиях, наряду с другими задачами нелинейной физики, входит в список тридцати особо важных и интересных проблем физики, сформулированных Российской академией наук и предназначенных к решению в XXI в. [9].

Итак, необходимо прежде всего научиться математически описывать движение тепловых и газовых потоков в помещениях и сооружениях различного назначения в условиях пожара. Попытки создания математических моделей пожара в помещении начались в 1970-х гг. Для построения таких моделей пожара чаще всего используют уравнения Навье – Стокса, т.е. дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости или газа, представляющие математическое выражение законов сохранения импульса и массы. Для исследования сжимаемых течений к этим уравнениям необходимо добавить уравнение состояния, связывающее между собой давление, плотность и температуру, и уравнение энергии [2].

Впервые эти уравнения вывел в 1822 г. французский ученый Анри Навье (несколько позже это сделал француз С.Д. Пуассон, затем англичанин Д.Г. Стокс). Однако до настоящего времени, спустя два столетия, строгий математический анализ разрешимости краевых задач гидроаэромеханики для уравнений Навье – Стокса сжимаемого газа отсутствует (имеются некоторые результаты в матема-

тической теории динамики вязкой несжимаемой жидкости). Эту проблему предстоит решить математикам XXI в. [9]. Существуют приближенные решения, основанные на упрощающих предположениях, которые во многих случаях удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Для решения некоторых классов задач динамики вязких жидкостей и газов были разработаны достаточно эффективные вычислительные алгоритмы, основанные на использовании разностных схем. Однако их широкое использование сдерживалось отсутствием соответствующей вычислительной техники, которая появилась только в 60–70-х гг. XX столетия.

Именно в это время и началось активное конструирование моделей пожара, сначала в двумерной, затем в трехмерной постановке. Эти модели основаны на упоминавшихся уже уравнениях механики сплошной среды, включающих в себя реологический закон Стокса, закон теплопроводности Фурье, законы диффузии, законы радиационного переноса в газовой среде и т.п. Однако эта модель пожара — система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих изменения во времени плотности, температуры и состава газовой среды в каждой точке пространства внутри исследуемого объекта, — достаточно громоздка и ее численное решение даже с помощью современных высокопроизводительных ЭВМ связано с большими трудностями (большое время вычислений для каждого варианта расчетов, принципиальная зависимость результатов от характеристик очага горения и выбранных вариантов развития пожара на объекте защиты). Существуют и другие проблемы, ограничивающие пока возможности практического использования дифференциальных (полевых) моделей (например, недостаточная изученность явления турбулентности, которую необходимо учитывать в этих моделях).

Тем не менее за последние десятилетия объединенными усилиями специалистов ряда стран (Великобритании, США, Японии и др.) созданы мощные вычислительные комплексы «Sofie», «Jasmine», «Phoenics» и др., которые позволяют реализовывать и исследовать разнообразные модели пожаров [10–12]. Но пока мы находимся в самом начале этого сложного и длительного процесса: создания адекватных математических полевых моделей пожара для различных объектов и их эффективного использования на практике.

Хотя полевые модели пожара в принципе позволяют получить наиболее полную и точную информацию об исследуемом процессе по сравнению с любыми другими математическими моделями пожара, однако не для всех прикладных

пожарно-технических задач необходима такая детальная информация. Поэтому во многих случаях на практике успешно используются и другие, более простые математические модели пожара, среди которых прежде всего нужно отметить так называемые интегральные модели [3–5].

Эти модели описывают изменение средне-объемных параметров состояния газовой среды (плотности, давления, концентрации различных компонентов среды, температуры) во времени при пожаре в помещении.

Усреднение всех этих параметров теоретически осуществляется с помощью интегральной теоремы о среднем, на практике — упрощенным расчетным путем. Далее на основе закона сохранения массы и первого закона термодинамики составляются так называемые уравнения пожара: уравнение материального баланса, уравнение кислородного баланса, уравнение баланса продуктов горения, уравнение баланса инертного газа и уравнение энергии пожара. К этим уравнениям добавляется усредненное уравнение состояния среды, находящейся в помещении при пожаре, которое связывает среднеобъемную температуру со среднеобъемными давлением и плотностью. Наконец, задаются начальные условия, характеризующие значения среднеобъемных параметров состояния среды в помещении перед пожаром.

Совокупность всех этих соотношений (большая часть которых представляет собой обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка) обеспечивает математическое описание пожара в помещении на уровне усредненных термодинамических параметров состояния среды. Именно эти соотношения и называют интегральной моделью пожара в помещении. Они были получены в середине 1970-х гг.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих развитие пожара в помещении, может быть получено (как это бывает практически всегда) только для некоторых частных случаев. В общем же случае эта система решается численными методами с помощью ЭВМ (например, методом Рунге – Кутты).

Во многих случаях при исследовании пожара в помещении целесообразно выделить в этом помещении несколько зон, для каждой из которых составить свою интегральную модель пожара. Совокупность таких моделей называют зонными моделями пожара в помещении [5, 13, 14].

Интегральная модель пожара используется, например, для исследования процессов нарастания опасных факторов пожара в помещениях и расчета критической продолжительности пожара.

До сих пор мы в самом общем виде рассматривали вопросы моделирования пожаров в помещении. При этом говорили только об аналитических детерминированных моделях, часто обращая внимание читателя на невозможность получения их точного решения и необходимость использования разнообразных численных методов современной вычислительной математики, требующих для их реализации современной вычислительной техники.

В действительности, как говорилось выше, все выглядит значительно сложнее даже для проблемы пожаров в зданиях, а ведь не меньшую сложность представляют для изучения и моделирования пожары вне зданий, например крупномасштабные пожары, пожары резервуаров, в шахтах, туннелях, газовых и нефтяных фонтанов, на транспорте, степные, лесные пожары и т.д. [3, 6, 15, 16].

На самом деле важнейшим параметром возможного пожара в помещении, характеризующим пожарную опасность данного объекта, является так называемая удельная тепловая мощность пожара в единицу времени. Ее оценка требует учета вида горючей нагрузки (ее физико-химических параметров, общего количества), строительных и архитектурных особенностей этого объекта, возможных условий и сценариев развития в нем пожара (степени разрушения остекленных проемов, ограждающих конструкций), от чего существенно зависит характер тепло- и массообмена при пожаре в данном помещении, а значит и его последствия, условия его ликвидации [3, 16–18].

Совершенно очевидно, что значительная часть перечисленных здесь факторов и параметров не может быть задана каким-то единственным набором числовых значений. Наоборот, здесь принципиально допустимо широкое варьирование этих значений и огромное количество возможных вариантов их сочетаний. К этому следует добавить вероятностные оценки надежности и эффективности автоматических систем пожарной сигнализации и пожаротушения, условий эвакуации людей из горящего здания, чтобы сделать вывод о том, что любой реальный пожар можно и нужно рассматривать как сложнейший случайный процесс (в теоретико-вероятностном смысле), характеризующийся многократной неопределенностью. В частности, по нашему мнению, теория огнестойкости дальнейшее существенное развитие получит именно на стохастической основе [2].

Следовательно, наряду с аналитическими детерминированными моделями пожаров разных типов и классов, необходимо развивать и аналитические вероятностные модели пожаров [3, 4].

Однако учитывая ограниченность возможностей любых аналитических моделей, обусловлен-

Статистика моделей пожаров

Fire Model Statistics

Уровень моделирования Modelling level	Объект моделирования Modelled entity	Страны-разработчики моделей Countries of models development	Ориентировочное число моделей Approximate number of models
1	1. Пожар в помещении (комнате) 2. Пожар в здании (несколько смежных комнат) 3. Пожары технологических объектов (с учетом их спецификации) 1. Fire in a room (room) 2. Fire in a building (several adjoining rooms) 3. Engineering facilities on fire(taking into account their specifications)	Великобритания, Россия, США, Швеция, Япония, Китай и др. UK, Russia, USA, Sweden, Japan, China, etc.	Около 100 About 100
2	Крупномасштабный (массовый) пожар в населенном пункте Large-scale (mass) fire in a settlement	Россия, США, Япония и др. Russia, USA, Japan, etc.	Не менее 5 At least, 5
3	Пожары в населенных пунктах и их ликвидация силами противопожарной службы (в основном, организационно-управленческие аспекты) Fires in the city and their elimination by fire-fighting brigades (mainly organizational and managerial aspects)	Россия, США, Великобритания, Япония и др. Russia, USA, UK, Japan, etc.	Около 10 About 10
4	Пожары на открытых пространствах (резервуары, лесобиржи и др.) Fires in open spaces (reservoirs, timber yards, etc.)	Россия, США, Япония и др. Russia, USA, Japan, etc.	Около 15 About 15
5	Лесные и другие растительные пожары Forest and other landscape fires	Австралия, Россия, Канада, США Australia, Russia, Canada, USA	Около 10 About 10
6	Подземные и подводные пожары (метрополитен, шахты, тоннели и др.) Underground and underwater fires (metro, mines, tunnels, etc.)	Россия, США, Германия и др. Russia, USA, Germany, etc.	Не менее 15 Not less than 15
7	Эвакуация людей и животных из горящих зданий [33–36] Evacuation of humans and animals from burning buildings [33–36]	Россия, Япония Russia, Japan	Не менее 10 Not less than 10

ную пока нынешним состоянием математической науки, выход нужно искать на пути создания все более мощных имитационных (компьютерных) моделей пожаров и связанных с ними процессов. Напомним, что имитационные модели представляют собой совокупность процедур и алгоритмов, описывающих моделируемый процесс и реализованных в виде программ для ЭВМ. Их широкому применению способствует быстрое развитие современной вычислительной математики и вычислительной техники [3, 19–24].

Моделирование процессов функционирования экстренных служб

Моделирование процесса функционирования экстренных служб (пожарная, полиция, скорая медицинская помощь и др.), начатое в России, Великобритании и США в середине 1960-х гг. на уровне построения аналитических моделей, ока-

залось малоэффективным из-за того, что эти модели описывали исследуемый процесс только во времени, хотя он носит принципиально пространственно-временной характер [21–24]. Поэтому для моделирования этого процесса пришлось создавать компьютерные имитационные модели (сначала элементарные [25–28], затем все более сложные [19, 21, 29, 30]), позволяющие учитывать практически неограниченное число параметров описываемого процесса.

В начале 1990-х гг. в России была создана компьютерная имитационная система (КИС) «КОСМАС» (Компьютерная Система Моделирования Аварийных Служб), получившая широкую известность в мире как информационная технология XXI в., которая с высокой степенью точности описывает реальные события, действия и процессы функционирования любых экстренных служб в городах и территориях. Данная КИС предназначена для исследования и экс-

пертизы деятельности экстренных служб, а также для проектирования их развития [19, 20]. Это была одна из первых в мире сложных специализированных КИС, которая нашла свое применение в более 45 городах и территориях разных стран мира для различных экстренных служб.

В мае 2005 г. Консультативный комитет по информационным технологиям при Президенте США представил Джорджу Бушу аналитический доклад под названием «Вычислительная наука: обеспечение конкурентоспособности Америки» [31]. Термин «вычислительная наука» появился в научно-технической литературе сравнительно недавно. Он обозначает быстро развивающуюся область научно-технического прогресса, связанную с созданием алгоритмов решения задач, имитационным моделированием различных явлений и процессов в науке и технике, а также с созданием программного обеспечения для целей имитационного моделирования [31].

В аналитическом докладе Президенту США достаточно убедительно показано, что развитие «вычислительной науки» создает уникальные возможности для проведения научных исследований, необходимых мировому сообществу XXI в. С использованием ее методов и средств ученые могут изучать самые разнообразные проблемы, исследование которых другими методами является неэффективным, а зачастую и просто невозможным. Диапазон этих проблем чрезвычайно широк

(от исследования Вселенной до биофизических процессов головного мозга, от крупномасштабных природных катаклизмов до распространения вирусов и анализа ядовитых веществ, используемых террористами, и многое, многое другое) [31].

Точно так же и наука о пожаре, ее дальнейшие успехи в борьбе с ним существенно зависят от ожидаемых в XXI в. достижений математики, физики, «вычислительной науки» и иных дисциплин.

Выводы

В заключение приведем таблицу, в которой перечислены известные модели в области обеспечения пожарной безопасности [32].

В этой таблице приведены более 150 моделей разных типов и классов. В большей части этих моделей описываются процессы тепломассопереноса при пожарах, динамика пожаров, поведение веществ, материалов, строительных конструкций, разнообразные модели поведения людей и животных в условиях пожара, их эвакуации, процессов функционирования подразделений противопожарной службы, подготовки кадров для нее и прочее.

Эти модели являются предметом и основой современной науки о пожарах. В результате создания и использования таких моделей появятся (и уже появляются) негорючие материалы, пожаробезопасные приборы, технологические процессы, здания, сооружения, новые средства и способы тушения пожаров и т.д.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cohen J.* Human ancestors tamed fire earlier than thought. 2018. URL: <https://www.history.com/news/human-ancestors-tamed-fire-earlier-than-thought> (Accessed September 15, 2022).
2. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П.* Человечество и пожары (краткий очерк). М. : ИПЦ Маска, 2007. 140 с.
3. Моделирование пожаров и взрывов / под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. М. : Пожнаука, 2000. 482 с.
4. *Пузач С.В.* Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
5. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
6. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.
7. *Drysdale D.* An introduction to fire dynamics. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2002.
8. *Freedman R.* Survey of competer models for fire and smoke. Factory Mutual Research Corp. USA, 1991.
9. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 4. С. 420–441.
10. *Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., Huang X., 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. *Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q.* Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
12. *Yakhou N., Thompson P., Siddiqui A., Abualdenien J., Ronchi E.* The integration of building information modelling and fire evacuation models //

- Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 63. P. 105557. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105557
13. Пузач С.В., Колодяжный С.А., Колосова Н.В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 33–39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39
 14. Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 76–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87
 15. Lafdal B., Djebbar R., Boulet P., Mehaddi R., Koutaib E.M., Beji T., Torero J.L. Numerical study of the combustion regimes in naturally-vented compartment fires // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 131. P. 103604. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103604
 16. Cao R.F., Lee E.W.M., Xie W., Gao D.L., Chen Q., Yuen A.C.Y. et al. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis // Journal of Safety Science and Resilience. 2022. Vol. 4. Issue 1. Pp. 75–92. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2022.09.006
 17. Li Y., Ko Y., Lee W. RGB image-based hybrid model for automatic prediction of flashover in compartment // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 132. P. 103629. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103629
 18. Юдович В.И. Глобальная разрешимость против коллапса в динамике несжимаемой жидкости // Математические события XX века. М. : ФАЗИС, 2003. С. 519–548.
 19. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П. и др. Безопасность городов: имитационное моделирование городских процессов и систем. М. : ФАЗИС, 2004. 172 с.
 20. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Основы теории организации, функционирования и управления экстренными и аварийно-спасательными службами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 92.
 21. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Коломиец Ю.И., Соколов С.В., Вагнер П. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов // Вестник РАН. 2012. Т. 12. № 3. С. 27–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23640414>
 22. Carter G.M., Ignall E.J. A simulation model of fire department operations: Design and preliminary results // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1970. Vol. 6. Issue 4. Pp. 282–293. DOI: 10.1109/TSSC.1970.300303
 23. Sauders P.B. A computer model for simulating the response activities of a fire department. NBS report 10488. 1971.
 24. Grace M. Carter. Simulation model of fire department operation. Program description. RB-242-400. USA, NY : The New York Rand Institute, 1974. 214 p.
 25. Брушлинский Н.Н., Гришин А.Ф., Соболев Н.Н. Об имитационном моделировании процесса функционирования пожарной охраны // Вопросы экономики в пожарной охране : сб. науч. тр. Вып. 6. М. : ВНИИПО, 1977. С. 51–55.
 26. Брушлинский Н.Н., Лысов Р.Н., Гришин А.Ф. Об одной имитационной модели процесса функционирования пожарной охраны // Вопросы экономики в пожарной охране. Вып. 7 : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1978. С. 10–14.
 27. Гаврилей В.М., Гришин А.Ф. Совершенствование системы противопожарной защиты города на основе методов имитационного моделирования // Экономика и управление в пожарной охране : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1983. С. 54–59.
 28. Сон Э.Г., Васильев Е.П., Конченков В.Н., Вилитенко А.Г. Имитационная модель функционирования пожарной охраны // Проблемы безопасности объектов народного хозяйства и административно-территориальных единиц : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1988. С. 66–74.
 29. Алехин Е.М., Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Компьютерные имитационные системы для деятельности экстренных служб города // Программные продукты и системы. 1994. № 4. С. 27–32.
 30. Alekhin E.M., Bruschkinsky N.N., Sokolov S.V., Wagner P. Russian simulation for strategic planning // Fire International. 1996. No. 11. Pp. 32–33.
 31. Колин К.К. Будущее информатики в XXI веке: российский ответ на американский вызов // Открытое образование. 2006. № 2. С. 73–77.
 32. Брушлинский Н.Н. Мировая пожарная статистика и ее роль в обеспечении пожарной безопасности на планете // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1997. Т. 6. № 4. С. 81–86.
 33. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 357 с.
 34. Холщевников В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 357 с.
 35. Babrauskas V. Analyzing ignition data for fire modeling purposes // Fire and Materials. 2021. Vol. 46. Issue 6. Pp. 896–904. DOI: 10.1002/fam.3037
 36. Mendez A., Farazmand M. Quantifying rare events in spotting: How far do wildfires spread? // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 132. P. 103630. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103630

REFERENCES

- Cohen J. *Human ancestors tamed fire earlier than thought*. 2018. URL: <https://www.history.com/news/human-ancestors-tamed-fire-earlier-than-thought> (Accessed September 15, 2022).
- Brushlinsky N.N., Sokolov S.V., Wagner P. *Humanity and Fires (short essay)*. Moscow, IPC Maska, 2007; 140. (rus).
- Simulation of fires and explosions*. Brushlinskogo N.N., Korolchenko A.Ya. (ed.). Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 482. (rus).
- Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii, 2005; 336. (rus).
- Molchadskiy I.S. *Fire in the compartment*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
- Grishin A.M. *Mathematical modeling of forest fires and new ways to fight them*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992; 408. (rus).
- Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2002.
- Freedman R. *Survey of competer models for fire and smoke*. Factory Mutual Research Corp. USA, 1991.
- Ginzburg V.L. What problems of physics and astrophysics seem especially important and interesting now (thirty years later, and already on the threshold of the 21st century)? *Advances in the Physical Sciences*. 1999; 169(4):420-441. (rus).
- Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., 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
- Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
- Yakhou N., Thompson P., Siddiqui A., Abualdenien J., Ronchi E. The integration of building information modelling and fire evacuation models. *Journal of Building Engineering*. 2021; 63:105557. DOI: 10.1016/j.job.2022.105557
- Puzach S.V., Kolodyazhnyy S.A., Kolosova N.V. Modified zonal model for calculating of the fire gas dynamics in the room taking into account the form of convective column. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):33-39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39 (rus).
- Puzach S.V., Mustafin V.M., Akperov R.G. A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):76-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87 (rus).
- Lafdal B., Djebbar R., Boulet P., Mehaddi R., Koutaib E.M., Beji T., Torero J.L. Numerical study of the combustion regimes in naturally-vented compartment fires. *Fire Safety Journal*. 2022; 131:103604. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103604
- Cao R.F., Lee E.W.M., Xie W., Gao D.L., Chen Q., Yuen A.C.Y. et al. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2022; 4(1):75-92. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2022.09.006
- Li Y., Ko Y., Lee W. RGB image-based hybrid model for automatic prediction of flashover in compartment. *Fire Safety Journal*. 2022; 132:103629. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103629
- Yudovich V.I. Global solvability versus collapse in incompressible fluid dynamics. *Mathematical events of the twentieth century*. Moscow, FAZIS Publ., 2003; 519-548. (rus).
- Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Vagner P., et al. *Security of cities: simulation of urban processes and systems*. Moscow, FAZIS Publ., 2004; 172. (rus).
- Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. *Fundamentals of the theory of organization, functioning and management of emergency and rescue services : monograph*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii 2018; 92. (rus).
- Alekhin E.M., Brushlinskiy N.N., Kolomiets Yu.I., Sokolov S.V., Vagner P. Task-oriented simulation systems for automating projection and strategic management of the city emergency services. *Herald of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2012; 12(3):27-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23640414> (rus).
- Carter G.M., Ignall E.J. A simulation model of fire department operations. Design and preliminary result. *IEEE Trans. System Sci. and Cybernetics*. 1970; 40:282-293.
- Sauders P.B. *A computer model for simulating the response activities of a fire department*. NBS report 10488. 1971.
- Carter G.M. *Simulation model of fire department operation. Program description. RB-242-400*. USA, NY : The New York Rand Institute, 1974; 214.
- Brushlinskiy N.N., Grishin A.F., Sobolev N.N. On simulation modeling of the process of functioning of the fire department. *Economics in the fire department/Proceedings of VNIPO. Vol. 6*. Moscow, VNIPO, 1977; 51-55. (rus).
- Brushlinskiy N.N., Lysov R.N., Grishin A.F. On one simulation model of the process of functioning of the fire department. *Economics and management in fire protection. Proceedings of VNIPO, Vol. 7*. Moscow, VNIPO, 1978; 10-14. (rus).
- Gavriley V.M., Grishin A.F. Improving the system of fire protection of the city based on simulation methods. *Economics and management in fire protection. Proceedings of VNIPO*. Moscow, VNIPO, 1983; 54-59. (rus).

28. Son E.G., Vasilyev E.P., Kopchenov V.N., Vilitenko A.G. Simulation model of the functioning of the fire department. *Problems of security of objects of the national economy and administrative-territorial units*. Moscow, VNIPO, 1988; 66-74. (rus).
29. Alekhin Ye.M., Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. *Computer simulation systems for the activities of emergency services of the city*. 1994; 4:27-32. (rus).
30. Alekhin E.M., Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Wagner P. Russian simulation for strategic planning. *Fire International*. 1996; 11:32-33.
31. Kolin K.K. The future of informatics in the 21st century: Russian response to the American challenge. "Open Education". *Open Education*. 2006; 2:73-77. (rus).
32. Brushlinskiy N.N. World fire statistics and its role in ensuring fire safety on the planet. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and explosion safety*. 1997; 6(4): 81-86. (rus).
33. Samoshin D.A. *Methodological basics of regulation of safe people evacuation from buildings in case of fire : Dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2017; 357. (rus).
34. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : Dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1983; 357.
35. Babrauskas V. Analyzing ignition data for fire modeling purposes. *Fire and Materials*. 2021; 46(6): 896-904. DOI: 10.1002/fam.3037
36. Farazmand A.M.M. Quantifying rare events in spotting: How far do wildfires spread? *Fire Safety Journal*. 2022; 132:103630. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103630

Поступила 21.11.2022, после доработки 05.12.2022;

принята к публикации 16.12.2022

Received November 21, 2022; Received in revised form December 5, 2022;

Accepted December 16, 2022

Информация об авторах

БРУШЛИНСКИЙ Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, профессор кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВА Маргарита Петровна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры организации деятельности пожарной охраны (в составе учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

Information about the authors

Nikolay N. BRUSLINSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

Sergey V. SOKOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510, e-mail: albrus-ssv@yandex

Margarita P. GRIGORIEVA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

ВАГНЕР Петер, канд. техн. наук, заместитель начальника Пожарной Академии города Берлина, Германия, 13503, г. Берлин, Руппинер Шоссе, 268; ORCID: 0000-0002-9485-8766; Scopus Autor ID: 57201767243; e-mail: drpeterwagner@freenet.de

Вклад авторов:

Брушлинский Н.Н. — научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста.

Соколов С.В. — концепция исследования; написание исходного текста; доработка текста; итоговые выводы.

Григорьева М.П. — поиск информации; доработка текста; итоговые выводы.

Вагнер П. — развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Peter WAGNER, Ph. D., Deputy Head of the Fire Academy of Berlin, Ruppiner Chaussee, 268, Berlin, 13503, Germany; ORCID: 0000-0002-9485-8766; Scopus Autor ID: 57201767243; e-mail: drpeterwagner@freenet.de

Contribution of the authors:

Nikolay N. Bruslinskiy — scientific management; research concept; methodology development; writing the draft; final conclusions.

Sergey V. Sokolov — research concept; writing the draft; final conclusions.

Margarita P. Grigorieva — follow-on revision of the text; final conclusions.

Peter Wagner — methodology development; writing the draft; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами

Дмитрий Александрович Корольченко ✉, Евгений Александрович Артемьев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Достаточно сложным и наукоемким случаем расчетного обоснования комплексной, механической и пожарной безопасности зданий и сооружений является оценка фактической огнестойкости их несущих строительных конструкций, выполненных из различных материалов и, в частности, из железобетона. Существующие методические подходы к расчету огнестойкости железобетонных конструкций не учитывают теплотехнические характеристики армирования, что позволяет получать согласующие с результатами экспериментов значения предела огнестойкости конструкций только при расчете бетонных конструкций и железобетонных конструкций процентом армирования до 3,5 %.

Цель работы. Апробация методики проведения гибридного эксперимента и оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами. Были решены следующие задачи:

- в соответствии с разработанной методикой проведены аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования огнестойкости сжатых бетонных и железобетонных элементов (в том числе с повышенными процентами армирования);
- выполнена оценка сходимости полученных результатов;
- разработаны выводы по рассматриваемым вопросам.

Методы исследования. Теоретические данные для сопоставления были получены аналитическим путем (по формулам и номограммам СП 468.1325800.2019), а экспериментальные и расчетные — в ходе параллельных экспериментальных исследований в огневой лаборатории НИУ МГСУ и численных исследований в программном комплексе ПК Abaqus. В ходе лабораторного эксперимента на прессовом оборудовании определялась прочность бетона контрольных кубов, с использованием разрывной машины — физико-механические характеристики арматурной стали. Далее изготавливались контрольные бетонные и железобетонные образцы с заданными характеристиками, после чего определялись температурные поля в бетонных и железобетонных поперечных сечениях образцов на основании данных термопар, а также испытывались центрально сжатые бетонные и железобетонные образцы в огневой камере при стандартной температуре пожара. Выполнялось моделирование исследуемых бетонных и железобетонных образцов с использованием объемных конечных элементов с размером до 10 мм и с использованием встроенного решателя «Heat transfer» (Теплообмен), проводился расчет распределения температурных полей при стандартной температуре пожара в бетонных и железобетонных элементах, а также расчеты огнестойкости железобетонных элементов при стандартном температурном пожаре.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований установлены:

- приемлемая для практических целей сходимость значений температур в контрольных точках (по термопарам) в бетонных образцах, полученных при экспериментальных лабораторных исследованиях и при расчете по действующим нормам, что показывает корректность проведения эксперимента;
- приемлемая для практических целей сходимость значений температур в контрольных точках (по термопарам) в бетонных и железобетонных образцах в ходе экспериментальных лабораторных исследований и при численном расчете, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований;
- значительная, необходимая к учету, разница результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %), что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры;
- приемлемая для практических целей сходимость результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов (разница составляет от 7 до 10 %), что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

Выводы. Подтверждена гипотеза о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения с высоким процентом армирования (более 3,5 %) при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом. Также доказана применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

Ключевые слова: огневое воздействие; огнестойкость строительных конструкций; теоретические данные; лабораторные исследования огнестойкости; численные исследования; математическое моделирование

Для цитирования: Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 69–79. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.69-79

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

Evaluating convergence between results of experimental studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements, having a higher percentage of reinforcement, and results of numerical calculations

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Evgeniy A. Artemyev

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

ABSTRACT

Introduction. Evaluation of actual fire resistance of load-bearing building structures made of various materials and reinforced concrete, in particular, encompasses a rather complex and research-intensive case of analysis of integrated, mechanical and fire safety of buildings and structures. Current methods of analyzing the fire resistance of reinforced concrete structures do not take into account any thermal characteristics of reinforcement. Hence, values of the fire resistance limit of structures can only be consistent with experimental results only if the percentage of reinforcement in analyzed concrete structures and reinforced concrete structures is below 3.5 %.

The purpose of the work. Is (1) the pilot testing of a hybrid experiment method and (2) evaluation of convergence between (a) results of experimental laboratory studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements with a higher percentage of reinforcement, (b) theoretical data and (c) numerical calculations. The following tasks were solved:

- in accordance with the developed method, analytical, experimental laboratory and numerical studies of fire resistance of compressed concrete and reinforced concrete elements (including those that have a higher percentage of reinforcement) were carried out;
- convergence between the obtained results was evaluated;
- conclusions were made about the issues under consideration.

Research methods. Theoretical data, applied for comparison purposes, were obtained analytically (using formulas and nomograms of SP (Construction Regulations) 468.1325800.2019), experimental and calculated data were obtained in the course of concurrent experimental studies conducted at the fire testing laboratory of NRU MGSU, and numerical studies were obtained using the Abaqus PC software package. In the course of a laboratory experiment made using the loading equipment, the strength of reference concrete templates was identified, using the tensile machine to find the physical and mechanical characteristics of reinforcing steel. Next, reference concrete and reinforced concrete specimens with pre-set characteristics were made. Then temperature fields in concrete and cross sections of specimens, containing reinforced concrete, were identified using the thermocouple data. Centrally compressed concrete and reinforced concrete specimens were tested in a fire chamber at a standard fire temperature. The behaviour of concrete and reinforced concrete specimens was simulated using volumetric finite elements, having the size of up to 10 mm, and a built-in Heat Transfer Solver (Heat transfer). Temperature field distribution and fire resistance of reinforced concrete elements were analyzed at a standard fire temperature in concrete and reinforced concrete elements.

Results and their discussion. The following knowledge was gained by means of this research project:

- convergence between temperature values at control points in concrete specimens (according to thermocouples), acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations made according to current standards, which confirms the validity of the experiment;
- convergence between temperature values at control points in concrete specimens (according to thermocouples), acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations made according to current standards, which confirms the validity of the proposed hybrid experiment method and the trustworthiness of the research;
- a great difference reaching 10 to 30 % (19.3 % on average for a group of specimens) between experimental and analytical values of fire resistance of reinforced concrete elements, which proves the hypothesis about a reduction in the heating temperature of concrete in a reinforced concrete section if the thermal influence of reinforcement is taken into account;

- convergence between fire resistance values (the difference is 7 to 10 %) in reinforced concrete specimens, which is acceptable for practical purposes. These values were obtained in the course of experimental laboratory studies and calculations, and their convergence proves the applicability of the proposed hybrid experiment method with account taken of the hypothesis about less intensive heating of concrete, if the thermal impact of reinforcement is taken into account.

Conclusions. The hypothesis about a reduction in the heating temperature of concrete in the reinforced concrete section that has a high percentage of reinforcement (more than 3.5 %) was proven, taking into account the thermal influence of reinforcement. The consequence is the underestimated values of fire resistance of reinforced concrete elements, identified in accordance with a standardized approach. The applicability of the proposed hybrid experiment technique is also proven, taking into account the hypothesis about a reduction in concrete heating due to the thermal influence of reinforcement.

Keywords: fire impact; fire resistance of building structures; theoretical data; laboratory studies of fire resistance; numerical studies; mathematical modelling

For citation: Korolchenko D.A., Artemyev E.A. Evaluating convergence between results of experimental studies on fire resistance of compressed reinforced concrete elements, having a higher percentage of reinforcement, and results of numerical calculations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):69-79. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.69-79 (rus).

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

Введение

Все здания и сооружения должны соответствовать определенным требованиям: функциональным, эксплуатационным, стоимостным и т.д. Одним из главных требований, предъявляемых к зданиям и сооружениям любого назначения, является их механическая и пожарная безопасность¹.

Базовые и перспективные методы расчетного обоснования механической безопасности зданий и сооружений в целом, а также их отдельных несущих строительных конструкций разработаны, апробированы и закреплены в нормах проектирования^{2, 3}. При этом достаточно сложным и наукоемким случаем расчетного обоснования комплексной, механической и пожарной безопасности зданий и сооружений является оценка фактической огнестойкости их несущих строительных конструкций, выполненных из различных материалов. Рядом специалистов и ученых в области пожарной безопасности, а именно: В.А. Пчелинцевым [1, 2], Э.Ф. Панюковым [3], И.Г. Романенковым [4], А.Е. Сегаловым [5], А.В. Забегаевым, В.М. Ройтманом [6, 7], А.Г. Тамразяном [8–10], В.С. Федоровым [11], Д.А. Корольченко [12, 13], К. Harada [14], D.D. Capua [15], M.C. McVay [16], A. Gibson [17], Duc Toan Pham [18], M.S. Abrams [19], P. Pimienta [20], J.Y. Kim [21] и др., были сделаны определенные разработки, позволяющие оценить несущую способность железобетонных конструкций, подверженных огневому воздействию. С точки зрения авторов, наибольший теоретический интерес и практическую значимость представляют

расчеты огнестойкости железобетонных конструкций как занимающих лидирующие позиции по объемам применения в современном строительстве. Ключевыми элементами (наиболее интенсивно работающими и имеющими наибольший требуемый предел огнестойкости по 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») являются вертикальные несущие элементы, в первую очередь колонны и пилоны.

Подробный анализ специальной литературы по теме исследования [22–26] позволил сделать вывод, что существующие методические подходы к расчету огнестойкости железобетонных конструкций не учитывают теплотехнические характеристики армирования. При расчете бетонных конструкций и железобетонных конструкций с процентом армирования до 3,5 % с использованием существующих методик и подходов получаемые значения предела огнестойкости конструкций согласуются с результатами экспериментальных исследований [12, 27, 28]. В данных случаях расчеты на огнестойкость выполняются по бетонному сечению без учета теплотехнических характеристик армирования.

Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований железобетонных конструкций с высоким процентом армирования (более 3,5 %), в том числе с жестким армированием (преимущественно — колонны), подробно не освещены в специальной технической и научной литературе. При этом представляется целесообразным учет возможного изменения температурных полей прогрева бетона при наличии арматуры в сечении. Указанное теоретически должно привести к перераспределению температуры с бетона на арматуру, некоторому увеличению несущей способности конструкций на каждом из временных этапов пожара (фактически — к увеличению предела огнестойкости) и, как

¹ Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

² СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности.

³ СТО 36554501-006–2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций.

следствие, к возможности более экономичного проектирования конструкций.

Для проверки данной гипотезы авторами разработана методика и выполнен гибридный эксперимент, т.е. комплекс аналитических, экспериментальных лабораторных и численных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования (более 3,5 %). Преимущества такого подхода заключаются в возможности обоснованной минимизации продолжительных и дорогостоящих лабораторных исследований огнестойкости конструкций. Последнее возможно лишь в случае обеспечения приемлемой для практических целей сходимости результатов параллельных исследований для характерных случаев.

Материалы и методы

В настоящей статье освещена методика проведения гибридного эксперимента и представлены данные по оценке сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами. Теоретические данные для сопоставления были получены аналитическим путем (по формулам и номограммам [2]), а экспериментальные и расчетные — в ходе параллельных экспериментальных исследований в огневой лаборатории НИУ МГСУ и численных исследований в программном комплексе ПК Abaqus. На основании полученных данных сформулированы основные выводы по рассматриваемым вопросам. В качестве *объекта исследования* были выбраны сжатые бетонные и железобетонные элементы в условиях огневых воздействий. *Предметом исследования* являлись такие искомые параметры и их сходимость для аналитических, экспериментальных лабораторных и численных исследований, как температурные поля поперечного сечения контрольных бетонных и железобетонных образцов, огнестойкость образцов. Также в процессе исследований оценивался экономический эффект от внедрения в практику проектирования результатов исследования.

Цель исследования — апробация методики проведения гибридного эксперимента и оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с теоретическими данными и численными расчетами.

Для достижения намеченной цели авторам потребовалось решить следующие основные задачи:

1. В соответствии с разработанной методикой провести аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования огнестойкости

сжатых бетонных и железобетонных элементов (в т.ч. с повышенными процентами армирования).

2. Выполнить оценку сходимости полученных результатов.

3. Разработать выводы по рассматриваемым вопросам.

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований

Как уже было отмечено, принципиальным отличием предлагаемого авторами подхода является учет при проведении расчетов на огнестойкость тепло-технических характеристик армирования железобетонного сечения — арматурных стержней и/или прокатных стальных профилей. Для обоснования применимости предлагаемого подхода были проведены параллельные аналитические, экспериментальные лабораторные и численные исследования.

Основные этапы лабораторного эксперимента:

- изготовление экспериментальных бетонных и железобетонных образцов-призм с размерами $100 \times 100 \times 400$ мм общим количеством 21 шт., с заданными характеристиками, а также контрольных бетонных кубов ($100 \times 100 \times 100$ мм, 8 шт.) и призм ($100 \times 100 \times 400$ мм, 6 шт.);
- испытания контрольных кубов и призм на прессовом оборудовании для определения прочности бетона, определение физико-механических характеристик арматурной стали на разрывной машине;
- определение температурных полей в бетонных и железобетонных поперечных сечениях образцов на основании данных термопар (по 6 бетонных и железобетонных образцов);
- испытание центрально сжатых бетонных и железобетонных образцов в огневой камере при стандартной температуре пожара (3 бетонных образца и 6 железобетонных образцов).

Принятые характеристики испытываемых образцов-призм: класс бетона по прочности на сжатие для всех образцов — В40, продольное армирование железобетонных образцов — 4Ø16 класса А500, $A_s = 8,04 \text{ см}^2$ ($\mu = 8,04 \%$), поперечное армирование — замкнутые хомуты диаметром 6 мм класса А240.

В ходе эксперимента бетонные и железобетонные образцы-призмы были замаркированы с использованием следующего подхода:

- первый компонент в маркировке определяет тип образца: «Б» — бетонный, «ЖБ» — железобетонный;
- второй компонент в маркировке указывает тип испытаний: «Т» — исследование температурных полей, «О» — испытания на огнестойкость;
- третий компонент в маркировке указывает номер образца соответствующего типа испытаний.

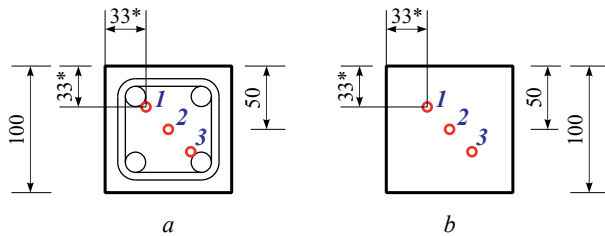


Рис. 1. Схема расположения термопар в железобетонном (а) и бетонном (b) сечениях: 1, 2, 3 — номера термопар

Fig. 1. Layout of thermocouples in reinforced concrete (a) and concrete (b) sections: 1, 2, 3 — thermocouple numbers

Например, маркировка «ЖБ-Т-2» означает, что испытывался второй из группы железобетонных образцов при исследовании температурных полей поперечного сечения элемента.

При проведении экспериментальных лабораторных исследований температурных полей бетонных и железобетонных элементов была принята следующая последовательность:

- установка термоэлектрических кабельных преобразователей (термопар) ТПК 005 в изготовленные образцы (рис. 1);
- установка образцов (по 6 шт.) в малогабаритную печь на равноудаленном расстоянии друг от друга, укрытие образцов сверху огнезащитным материалом — керамоволокном (рис. 2);
- получение в ходе испытаний фактических температур в контрольных точках бетонных и железобетонных образцов. В процессе испытания фиксировалась температура в исследуемых точках и сопоставлялась с продолжительностью огневого воздействия.

Экспериментальные исследования бетонных и железобетонных образцов на огнестойкость проводили в следующем порядке:

- установка доборной колонны, установка образца в горизонтальную печь;
- закрытие печи технологической крышкой, имеющей отверстие для гидроцилиндра пресса (рис. 3);
- загрузка образца расчетной нагрузкой, которая не увеличивается в процессе огневого воздействия (испытания);
- испытание образца огнем воздействием по стандартному изменению температуры пожара до достижения разрушения образца, с фиксацией времени огневого воздействия.

В процессе лабораторных испытаний в печи был создан стандартный температурный режим, характеризуемый следующей зависимостью:

$$T = 345 \lg(8t + 1) + T_0,$$

где T — температура в печи, соответствующая времени t , °C;



Рис. 2. Общий вид малогабаритной печи с установленными образцами перед испытанием

Fig. 2. General view of a small-sized furnace with specimens installed inside before testing



Рис. 3. Технологическое отверстие сверху горизонтальной печи для нагружения прессом во время огневого воздействия

Fig. 3. Service opening on top of a horizontal furnace for the application of loading during fire exposure

t — время нагрева, мин;

T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия, °C.

Методика проведения численных исследований

При выполнении численных исследований температурных полей сечений и огнестойкости бетонных и железобетонных элементов использовался ПК Abaqus как эффективный инструмент решения для самых сложных задач в нелинейной поста-

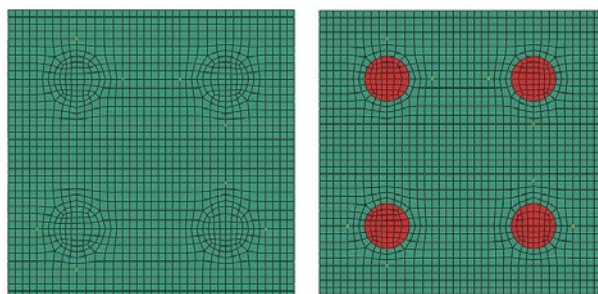


Рис. 4. Геометрическая модель и сетка объемных конечных элементов в бетонном (a) и железобетонном (b) сечениях

Fig. 4. Geometric model and mesh of volumetric finite elements in concrete (a) and reinforced concrete (b) sections

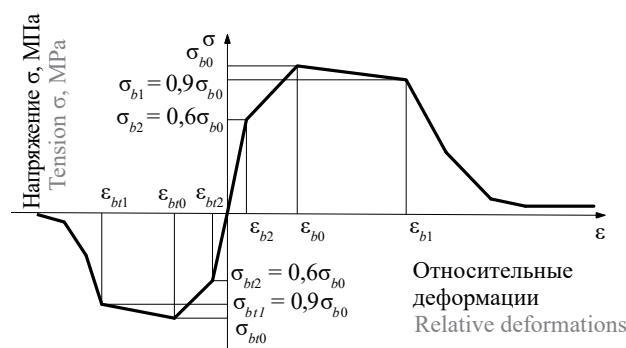


Рис. 5. Расчетная диаграмма деформирования бетона в ПК Abaqus

Fig. 5. Calculating diagram of concrete deformation in Abaqus software package

новке, в том числе при переменных характеристиках теплопроводности и теплоемкости.

При моделировании исследуемых бетонных и железобетонных образцов использовались объемные конечные элементы с размером до 10 мм (рис. 4).

Для решения задач, связанных с высокотемпературными нагревами, использовался встроенный решатель «Heat transfer» (Теплообмен), в свойствах которого задавались период времени решения и шаг приращения интегрирования, параметры теплопроводности и удельной теплоемкости для каждого материала.

При моделировании работы бетона использовалась нелинейная модель поведения на растяжение и сжатие (Concrete damage plasticity), которая учитывает образование и развитие трещин. Описание свойств деформирования бетона задавалось диаграммой, приведенной на рис. 5.

При моделировании арматуры использовалась модель пластичности (Plastic). Для описания свойств деформирования арматуры при одноосном растяжении/сжатии задавалось диаграммой, приведенной на рис. 6.

В программном комплексе Abaqus были выполнены численные расчеты, идентичные алгоритму

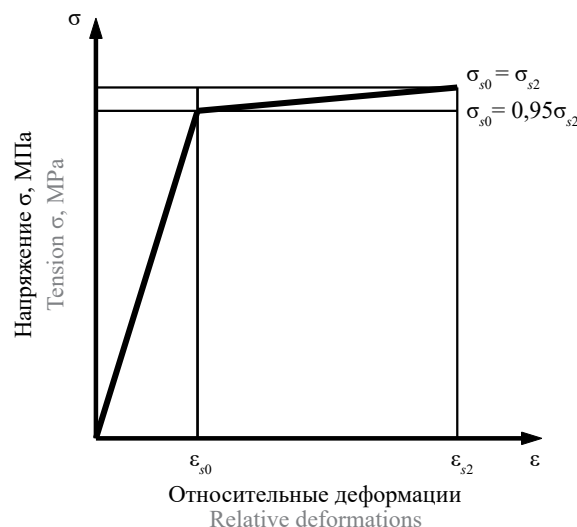


Рис. 6. Расчетная диаграмма деформирования арматуры в ПК Abaqus

Fig. 6. Calculating diagram of reinforcement deformation in Abaqus software package

проведения экспериментальных лабораторных исследований, а именно:

- расчет распределения температурных полей при стандартной температуре пожара в бетонных и железобетонных элементах;
- расчеты огнестойкости железобетонных элементов при стандартном температурном пожаре.

Результаты и их обсуждение

Оценка сходимости результатов экспериментальных лабораторных исследований температур прогревов поперечных сечений с результатами численных расчетов в ПК Abaqus

В табл. 1 представлены значения и результаты сравнительного анализа температур в контрольных точках поперечных сечений железобетонных и бетонных образцов, полученных при проведении экспериментальных исследований и численных расчетов в ПК Abaqus при 60 мин огневого воздействия.

На основании анализа данных табл. 1 сделаны следующие выводы:

1. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями температур в контрольных точках железобетонных сечений составляет от 3,2 до 3,7 %.
2. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями температур в контрольных точках бетонных сечений составляет от 2 до 2,2 %.
3. Выполненное сравнение полученных температур прогревов в ходе экспериментальных лабораторных исследования и при численном расчете показало приемлемую для практических целей

Таблица 1. Значения и результаты сравнительного анализа температур в контрольных точках поперечных сечений бетонных и железобетонных образцов при 60 мин огневого воздействия (экспериментальные данные и численные расчеты)

Table 1. Values and results of comparative analysis of temperatures at control points of cross sections of concrete and reinforced concrete specimens after 60 minutes' fire exposure (experimental data and numerical calculations)

Образец Specimen	Параметр Parameter	Натурный эксперимент $t_{н}$, °C Field experiment t_f , °C	Численный эксперимент $t_{н}$, °C Numerical experiment t_n , °C	$t_n/t_{н}$, % t_f/t_n , %
Железобетонный образец Reinforced concrete specimen	Температура в термопарах № 1/№ 3 Temperature in thermocouples No. 1/No. 3	790	816	3,2
	Температура в термопаре № 2 Temperature in thermocouple No. 2	698	725	3,7
Бетонный образец Concrete specimen	Температура в термопарах № 1/№ 3 Temperature in thermocouples No. 1/No. 3	823	839	2
	Температура в термопаре № 2 Temperature in thermocouple No. 2	731	763	2,2

сходимость результатов, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований.

Оценка сходимости значений огнестойкости железобетонных образцов, полученных в ходе экспериментальных лабораторных, аналитических и численных исследований

Ввиду длительности проведения экспериментальных исследований на огневое воздействие, характеризующейся сложностью подготовки к каждому испытанию, переоснасткой, а также ограничением технических характеристик лабораторного пресса (100 тонн) расчетное время подтверждения огнестойкости при постоянном приложении нагрузки 418,79 кН принято 25 мин (1500 с).

В табл. 2 и на рис. 7 представлены значения и результаты сравнительного анализа огнестойкости железобетонных образцов, полученных при прове-

Таблица 2. Значения и результаты сравнительного анализа огнестойкости железобетонных образцов

Table 2. Values and results of comparative analysis of fire resistance of reinforced concrete specimens

Тип образца Specimen type	Огнестойкость / Fire resistance			Сравнение Comparison	
	Эксперимент t_e , мин Experiment t_e , min	СТО [3] $t_{сто}$, мин Corporate standard [3], $t_{c.st}$, min	Численный расчет $t_{чис}$ Numerical calculation t_{num}	$t_e/t_{сто}$ $t_e/t_{c.st}$	$t_e/t_{чис}$ t_e/t_{num}
ЖБ-О-1 RC-O-1	32,5	25	29,5	1,3	1,10
ЖБ-О-2 RC-O-2	31,5			1,26	1,07
ЖБ-О-3 RC-O-3	28			1,12	0,95
ЖБ-О-4 RC-O-4	29			1,16	0,98
ЖБ-О-5 RC-O-5	27,5			1,1	0,93
ЖБ-О-6 RC-O-6	30,5			1,22	1,03

дении экспериментальных исследований и определенных в ходе аналитических и численных расчетов.

На рис. 7 представлены графические зависимости вида «Нагрузка–Время» при испытании на огнестойкость железобетонных образцов.

На основании анализа данных табл. 2 и рис. 7 сделаны следующие выводы:

1. Разница полученных результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %). Таким образом, выявлена значительная, необходимая к учету разница результатов, что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом.

2. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 7 до 10 %. Для группы образцов ЖБ-О-1, ЖБ-О-2 и ЖБ-О-6 установлено превышение осредненного экспериментального значения огнестойкости над осредненным численным на ~6,5 %, а для группы

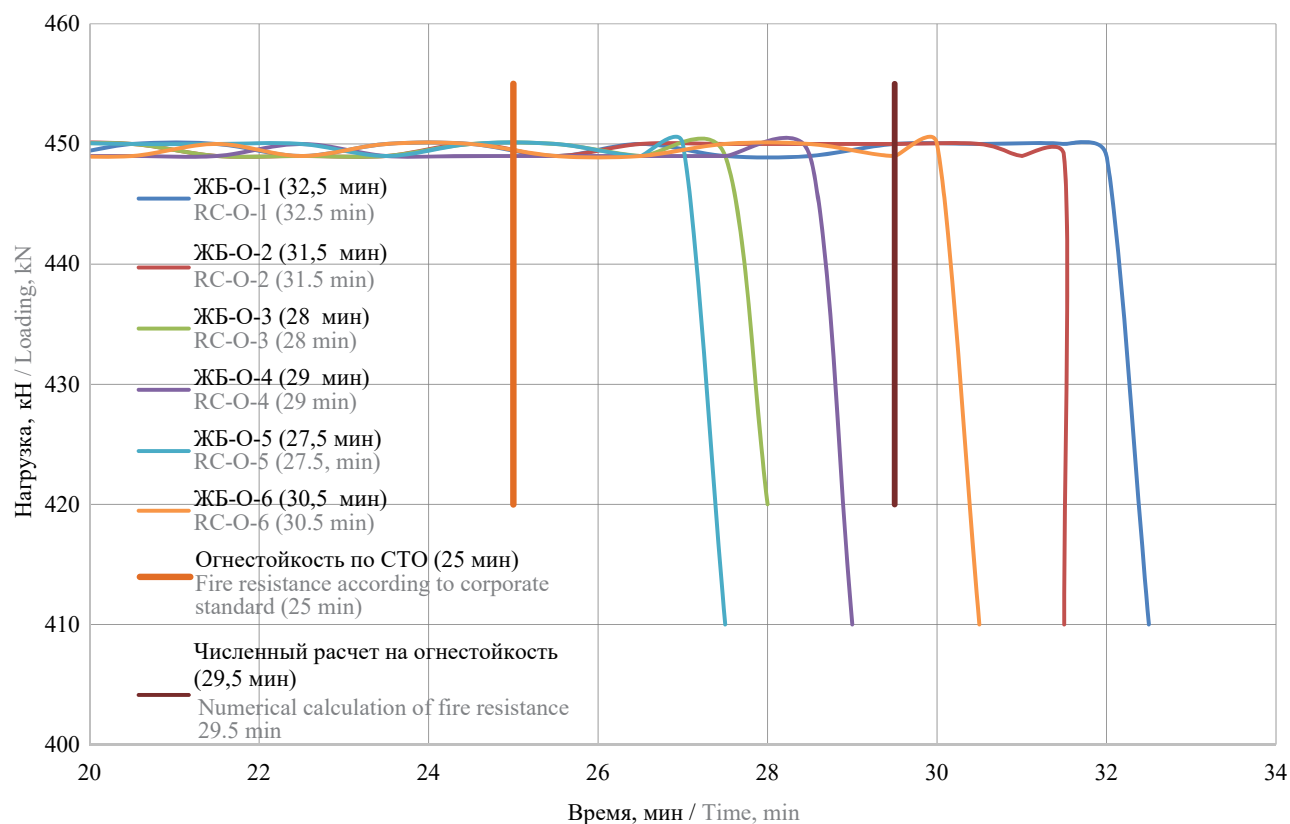


Рис. 7. Зависимости вида «Нагрузка–Время» при испытании на огнестойкость

Fig. 7. Loading to time dependences during the fire resistance test

образцов ЖБ-О-3, ЖБ-О-4 и ЖБ-О-5 — превышение осредненного численного значения огнестойкости над осредненным экспериментальным на ~4,5 %. Таким образом, установлена приемлемая для практических целей сходимость результатов, что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

3. Дополнительным подтверждением целесообразности учета теплотехнических параметров арматурных включений являются численные исследования, по результатам которых огнестойкость аналогичных натурным исследованиям образцов составляет 29,5 мин.

Выводы

Весь комплекс выполненных экспериментальных лабораторных, аналитических и численных исследований огнестойкости бетонных и железобетонных образцов, а также оценка сходимости полученных результатов позволили сделать следующие основные выводы:

1. Выполненное сравнение полученных температур прогревов в контрольных точках бетонных и железобетонных образцов в ходе экспериментальных лабораторных исследованиях и при численном

расчете показало приемлемую для практических целей сходимость результатов, что указывает на корректность предложенной методики гибридного эксперимента и достоверность проведенных исследований.

2. Разница полученных результатов между экспериментальными и аналитическими значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 10 до 30 % (в среднем для группы образцов — 19,3 %). Таким образом, выявлена значительная, необходимая к учету разница результатов, что подтверждает гипотезу о снижении температуры прогрева бетонной части железобетонного сечения при учете теплотехнического влияния арматуры. Следствием здесь являются заниженные значения огнестойкости железобетонных элементов, определенные в соответствии с нормируемым подходом.

3. Разница полученных результатов между экспериментальными и численными значениями огнестойкости железобетонных элементов составляет от 7 до 10 %. Таким образом, установлена приемлемая для практических целей сходимость результатов, что доказывает применимость разработанной методики гибридного эксперимента с учетом выдвинутой гипотезы об уменьшении прогрева бетона за счет учета теплотехнического влияния арматуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пчелинцев А.В. Влияние совместной работы конструкций на огнестойкость зданий и сооружений // Обеспечение огнестойкости зданий и сооружений при применении новых строительных материалов и конструкций : мат. сем. М. : МДНТП, 1988. С. 5–20.
2. Пчелинцев А.В. Исследование остаточной несущей способности изгибаемых преднапряженных железобетонных конструкций после высокотемпературного воздействия (пожара) : дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 203 с.
3. Панюков Э.Ф. Оценка состояния железобетонных конструкций после пожара : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1991. 389 с.
4. Романенков И.Г. Методы огневых испытаний строительных материалов и конструкций. М. : ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1984. 56 с.
5. Сегалов А.Е. Учет влияния режимов нагрева на критические температуры арматурных и строительных сталей // Жаростойкие и обычные бетоны при действии повышенных и высоких температур. М. : НИИЖБ, 1988. С. 60–67.
6. Забегаев А.В., Тамразян А.Г., Дронов Ю.П., Ройтман В.М. Разработка способов снижения риска от пожаров зданий и сооружений // Жилищное строительство. 2002. № 2. С. 26–29.
7. Ройтман В.М., Приступюк Д.М., Агафонова В.В. Возникновение и развитие теории стойкости конструкций и зданий при комбинированных особенных воздействиях с участием пожара // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 4–12.
8. Тамразян А.Г. К оценке огнеударостойкости несущих железобетонных конструкций высотных зданий // Жилищное строительство. 2005. № 4. С. 7–8.
9. Тамразян А.Г., Мехрализадех А.Б. Особенности проявления огневых воздействий при расчете на прогрессирующее обрушение зданий с переходными этажами // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. Курск : 2012. С. 79–85.
10. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23217619>
11. Федоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
12. Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных элементов с учетом теплотехнических характеристик арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 6. С. 37–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41
13. Корольченко Д.А., Поландов Ю.Х., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. № 29 (1). С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
14. Harada K.A. Study on the prediction of temperature rise in fire resistance test : Ph.D thesis. Kyoto University, 1992. 198 p.
15. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire // Fire Safety Journal. 2007. Vol. 42. Issue 2. Pp. 139–149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.009
16. Chung J.H., Consolazio G.R., McVay M.C. Finite element stress analysis of a reinforced high-strength concrete column in severe fires // Computer & Structures. 2006. Vol. 84. Issue 21. Pp. 1338–1352. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.03.007
17. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete // Computer & Structures. 2012. Vol. 94–95. Pp. 54–69. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.12.002
18. Pham D.T., Buhan P., Florence C., Heck J.V., Nguyen H.H. Interaction diagrams of reinforced concrete sections in fire: A yield design approach // Engineering Structures. 2015. Vol. 90. Pp. 38–47. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.012
19. Lie T.T., Lin T.D., Allen D.E., Abrams M.S. Fire resistance of reinforced concrete columns // National research Council Canada Division of Building research. Ottawa, 1984. 196 p.
20. Pimienta P. New technique for measuring radial deformations of concrete at high temperatures // University Meetings of Civil Engineering. 2006. 187 p.
21. Sin Y.S., Park J.E., Mun J.-Y., Kim J.Y. Experimental studies on the effect of various design parameters on thermal behaviors of high strength concrete columns under high temperatures // Journal of the Korea Concrete Institute. 2011. Vol. 23. Issue 3. Pp. 377–384. DOI: 10.4334/JKCI.2011.ф23.3.377
22. Мурашев В.И. Оценка огнестойкости железобетонных конструкций // Пожарное дело. 1956. № 7. С. 94.
23. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 142 с.
24. Яковлев А.И. Расчет пределов огнестойкости сжатых железобетонных конструкций по критическим деформациям // Поведение строитель-

- ных конструкций в условиях пожара : сб. тр. ВНИИПО МВД СССР. М., 1987. С. 5–16.
25. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 1986. 255 с.
 26. Милованов А.Ф., Соломонов В.В., Кузнецова И.С. Огнестойкость и огнесохранность зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 39–40.
 27. Кузнецова И.С. Прочность и деформативность железобетонных конструкций, поврежденных пожаром : дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 155 с.
 28. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.

REFERENCES

1. Pchelintsev A.V. The influence of joint work of structures on the fire resistance of buildings and structures. *Ensuring the Fire Resistance of Buildings and Structures When Using New Building Materials and Structures : Materials of the Seminar*. Moscow, MDNTP Publ., 1988; 5-20. (rus).
2. Pchelintsev A.V. *Investigation of the residual load-bearing capacity of bent prestressed reinforced concrete structures after high-temperature exposure (fire) : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1988; 203. (rus).
3. Panyukov E.F. *Assessment of the state of reinforced concrete structures after a fire : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1991; 389. (rus).
4. Romanenkov I.G. *Methods of fire tests of building materials and structures*. Moscow, TsNTI on civil engineering and architecture, 1984; 56. (rus).
5. Segalov A.E. Taking into account the influence of heating modes on the critical temperatures of reinforcing and building steels. *Heat-Resistant and Conventional Concretes under the Action of Elevated and High Temperatures*. Moscow, NII ZHB Publ., 1988; 60-67. (rus).
6. Zabegaev A.V., Tamrazyan A.G., Dronov Yu.P., Roitman V.M. Development of methods reducing the risk from fires of buildings and structures. *Housing Construction*. 2002; 2:26-29. (rus).
7. Roitman V.M., Pripodyuk D.M., Agafonova V.V. Emergence and development of the theory of stability of structures and buildings at the combined special influences with participation of a fire. *Industrial and Civil Construction*. 2010; 10:4-12. (rus).
8. Tamrazyan A.G. To assess the fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures of high-rise buildings. *Housing Construction*. 2005; 4:7-8. (rus).
9. Tamrazyan A.G., Mehralizadeh A.B. Features of the manifestation of fire effects when calculating the progressive collapse of buildings with transitional floors. *Safety of the construction fund of Russia. Problems and solutions : Materials of international academic readings*. Kursk, 2012; 79-85.
10. Tamrazyan A.G. Calculation of out-of-center compressed elements under dynamic loading under conditions of fire impacts. *Industrial and civil construction*. 2015; 3:29-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23217619> (rus).
11. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Molchadsky I.S., Alexandrov A.V. *Fire resistance and fire hazard of building structures*. Moscow, DIA Publ., 2009; 408. (rus).
12. Korolchenko D.A., Artemyev E.A. Calculation of fire resistance of compressed reinforced concrete elements taking into account the heat and technical characteristics of reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 6:37-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41 (rus).
13. Korolchenko D.A., Polandov Yu.Kh., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
14. Harada K.A. *Study on the prediction of temperature rise in fire resistance test : Ph.D thesis*. Kyoto University, 1992; 198.
15. Capua D.D., Mari A.R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2007; 42(2):139-149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.009
16. Chung J.H., Consolazio G.R., McVay M.C. Finite element stress analysis of a reinforced high-strength concrete column in severe fires. *Computer & Structures*. 2006; 84(21):1338-1352. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.03.007
17. Davie C.T., Zhang H.L., Gibson A. Investigation of a continuum damage model as an indicator for the prediction of spalling in fire exposed concrete. *Computer & Structures*. 2012; 94-95:54-69. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.12.002
18. Pham D.T., Buhan P., Florence C., Heck J.V., Nguyen H.H. Interaction diagrams of reinforced concrete sections in fire: A yield design approach. *Engineering Structures*. 2015; 90:38-47. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.012
19. Lie T.T., Lin T.D., Allen D.E., Abrams M.S. Fire resistance of reinforced concrete columns. *National research Council Canada Division of Building research*. Ottawa, 1984; 196.
20. Pimienta P. *New technique for measuring radial deformations of concrete at high temperatures*. University Meetings of Civil Engineering. 2006; 187.
21. Sin Y.S., Park J.E., Mun J.-Y., Kim J.Y. Experimental studies on the effect of various design parameters on

- thermal behaviors of high strength concrete columns under high temperatures. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2011; 23(3):377-384. DOI: 10.4334/JKCI.2011.23.3.377
22. Murashev V.I. *Assessment of fire resistance of reinforced concrete structures*. Moscow, Prosvetitel' Publ., 1956; 7:94. (rus).
 23. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 142.
 24. Yakovlev A.I. Calculation of fire resistance limits of compressed reinforced concrete structures by critical deformations. *Behavior of building structures in fire conditions : Sb. tr. VNIPO of the Ministry of Internal Affairs of the USSR*. Moscow, 1987; 5-16. (rus).
 25. Milovanov A.F. *Fire resistance of reinforced concrete structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 255. (rus).
 26. Milovanov A.F., Solomonov V.V., Kuznetsova I.S. Fire resistance and fire safety of buildings and structures. *Industrial and Civil Construction*. Moscow, 2002; 9:39-40. (rus).
 27. Kuznetsova I.S. Strength and deformability of reinforced concrete structures damaged by fire : *dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1999; 155. (rus).
 28. Tamrazyan A.G. Calculation of non-centrally compressed elements under dynamic loading under conditions of fire impacts. *Industrial and Civil Construction*. 2015; 3:29-35. (rus).

Поступила 23.11.2022, после доработки 15.12.2022;

принята к публикации 27.01.2023

Received November 23, 2022; Received in revised form December 15, 2022;

Accepted January 27, 2023

Информация об авторах

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 Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

АРТЕМЬЕВ Евгений Александрович, исследователь, преподаватель-исследователь, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 928691; ResearcherID: HKP-0992-2023; ORCID: 0000-0003-3649-7488; e-mail: eartemiev@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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 Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Evgeniy A. ARTEMYEV, Researcher, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 928691; ResearcherID: HKP-0992-2023; ORCID: 0000-0003-3649-7488; e-mail: eartemiev@mail.ru

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Пожарная опасность взрывных режимов испарения сжиженного природного газа

Юрий Николаевич Шебеко ✉

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. На основе рассмотрения результатов опубликованных исследований проанализирована специфика пожарной опасности взрывных режимов испарения сжиженного природного газа (СПГ). К числу таких режимов относятся ролловер и быстрый фазовый переход (БФП).

Особенности процессов взрывного испарения СПГ. Ролловер реализуется в резервуарах хранения СПГ при самопроизвольном смешении слоев продукта, имеющих различные температуры и плотности. Такие слои образуются при подаче в резервуар, содержащий остаточное количество хранимого СПГ («старый» продукт), новой партии СПГ («свежий» продукт) с другими параметрами (температура, плотность, состав). Ролловер сопровождается режим (взрывным) увеличением скорости испарения с соответствующим ростом давления в резервуаре, которое может превысить допустимое для резервуара значение. Быстрый фазовый переход происходит при контакте воды и пролитого на ее поверхность СПГ, в результате чего может реализоваться взрывное испарение сжиженного природного газа с образованием ударных волн и обширных зон загазованности.

Исследования эффекта ролловера. Отмечено, что для возникновения ролловера необходимым условием является стратификация (образование слоев продукта с различными температурами и плотностями). При этом за счет теплообмена нижнего (более плотного) слоя со стенками резервуара может происходить его перегрев с уменьшением плотности продукта. Одновременно происходит преимущественное испарение из верхнего слоя легких компонентов (метана, азота) с увеличением плотности продукта в верхнем слое. При выравнивании плотностей слоев происходит их самопроизвольное перемешивание со взрывным вскипанием нижнего перегретого слоя. Величина временной задержки возникновения ролловера может достигать 60–70 ч после загрузки «свежего» продукта в резервуар со «старым» продуктом.

Исследования эффекта быстрого фазового перехода. В случае БФП энергия, выделяющаяся при взрывном испарении, и давление в ударной волне зависят от многих факторов, таких как скорость истечения СПГ, локализация источника истекающего продукта — над или под уровнем воды, состав СПГ, температура воды. Найдено, что опасные для целостности зданий и сооружений давления в ударной волне наблюдаются на расстояниях до 500 м от места пролива. Получено эмпирическое соотношение, связывающее температуру воды при возникновении БФП с предельной температурой перегрева СПГ, выше которой кипение происходит в режиме гомогенной нуклеации.

Выводы. Показано, что реализация взрывных режимов испарения СПГ приводит к существенному увеличению уровня пожарной опасности объектов хранения и транспортировке сжиженного природного газа. Сформулированы рекомендации по предотвращению возникновения данных явлений.

Ключевые слова: ролловер; быстрый фазовый переход; стратификация жидкой фазы; ударная волна; перегрев жидкой фазы

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Пожарная опасность взрывных режимов испарения сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 80–88. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.80-88

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

The fire hazard of explosive regimes of liquefied natural gas evaporation

Yury N. Shebeko ✉

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. The fire hazard of explosive regimes of liquefied natural gas (LNG) evaporation was analyzed on the basis of the published research findings. These regimes include the rollover and the rapid phase transition (RPT).

Characteristics of explosive regimes of LNG evaporation. Rollover occurs in LNG storage tanks in case of spontaneous mixing of LNG layers having different temperatures and densities. These layers emerge when the “fresh” product is loaded into a vessel containing the residual amount of product stored there before. A rapid increase in the LNG evaporation rate accompanies a pressure rise inside the tank, which can exceed an allowable pressure of the tank. RPT occurs at a contact of LNG and water in the case of a release of liquefied natural gas onto a water surface. An explosive evaporation of LNG can cause in this case a formation of a shock wave and a large-scale vapor cloud.

Investigations of rollovers. It was mentioned that a stratification of LNG in a storage tank is a necessary condition of a rollover. Two layers with different temperatures and densities are formed during this stratification. A superheating of a lower layer occurs at a heat exchange between the LNG and tank walls with a decrease of a density of this layer. A preferential evaporation of light components of LNG (methane, nitrogen) takes place in the upper layer, and the density of this layer increases. When the densities of these layers are equalized a spontaneous mixing of these layers occurs with an explosive evaporation of the product in the lower superheated layer. A time delay of rollover can reach 60–70 hours after the supply of the “fresh” product into the tank with “old” product.

Investigations of a rapid phase transition. An energy released at the explosive evaporation and a pressure in a shock wave depend on many factors such as a LNG release rate, a position of a source of the LNG release — over or under a water level, a product composition, water temperature etc. It was found that a pressure hazardous for buildings and structures can take place at distances 250–500 m from the point of the release. The empirical correlation was proposed connecting a water temperature at the RPT occurrence and the superheating temperature of LNG at which a boiling takes place in the regime of a homogeneous nucleation.

Conclusions. It was shown that a realization of the explosive regimes of the LNG evaporation increases a fire hazard of objects for a storage and a transportation of liquefied natural gas. Recommendations for a prevention of such regimes are formulated.

Keywords: rollover; rapid phase transition; stratification; shock wave; superheated liquid

For citation: Shebeko Yu.N. The fire hazard of explosive regimes of evaporation of liquefied natural gas. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):80-88. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.80-88 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

В настоящее время в связи с реализацией крупных проектов по производству, транспортировке и использованию сжиженного природного газа возникает проблема разработки нормативных документов по пожарной безопасности, учитывающих специфику СПГ. Разработка данных документов должна базироваться на оценке опасности технологических процессов с использованием сжиженного природного газа, для которой необходимо понимание особенностей протекания пожароопасных аварий на объектах с наличием СПГ. К их числу относятся процессы взрывного испарения СПГ при проливе данного продукта на поверхность воды (быстрый фазовый переход) и в результате смешения в резервуаре хранения партий продукта с различными плотностями и температурами (ролловер). До настоящего времени эти пожароопасные процессы недостаточно учитываются при проектировании объектов с наличием СПГ.

В связи с вышесказанным настоящая работа посвящена анализу публикаций по изучению БФП и ролловера на объектах с наличием СПГ и формулировке на основе этого анализа предварительных рекомендаций по предотвращению указанных явлений.

Особенности процессов взрывного испарения СПГ

Наряду с испарением СПГ из пролива, характеризующегося относительно небольшими скоростями, возможны эффекты быстрого (взрывного) вскипания данного продукта. К числу этих явлений относятся ролловер и быстрый фазовый переход. Данные явления могут быть инициаторами пожароопасных ситуаций на объектах с использованием СПГ. Пользуясь определениями стандарта ГОСТ Р 57431–2017 (ИСО 16903:2015) «Газ природный сжиженный. Общие характеристики», рассмотрим основные особенности этих явлений.

Термин «ролловер» относится к процессу, при котором в резервуарах для хранения СПГ образуется большое количество паров в течение короткого промежутка времени. Ролловер может привести к возникновению недопустимого избыточного давления в резервуаре хранения СПГ, если не приняты меры для предотвращения указанного явления. Наиболее известной аварией такого типа является инцидент в Ла-Специя (La Spezia), описанный в работе [1].

В резервуарах хранения СПГ возможно наличие двух устойчивых слоев, которые образуются, как правило, в результате неполного смешения СПГ разной плотности и температуры — свежего и остатка

в резервуаре. Внутри каждого из слоев плотность жидкости одинакова, но плотность жидкости в нижнем слое больше плотности жидкости в верхнем слое. В дальнейшем из-за притока тепла от стенок резервуара плотности слоев выравниваются с дальнейшим самопроизвольным перемешиванием слоев. Такое самопроизвольное перемешивание называется ролловером. Если жидкость в нижней части резервуара становится перегретой относительно давления паровой фазы, то ролловер сопровождается резким (взрывным) увеличением скорости испарения. В этом случае повышение давления в резервуаре может быть достаточным не только для срабатывания предохранительных клапанов, но и для разрушения резервуара.

Возникновению ролловера, как правило, предшествует период, в течение которого скорость образования отпарного газа существенно ниже обычной. Поэтому следует контролировать скорость образования отпарного газа, чтобы убедиться, что жидкая фаза не аккумулирует тепло. Следует обеспечить циркуляцию жидкости в резервуаре для контролируемого перемешивания нижнего и верхнего слоев.

Ролловер можно предотвратить с помощью эффективного управления резервами СПГ. Сжиженный природный газ от разных производителей, имеющий разный состав, следует хранить в отдельных резервуарах. Если невозможно обеспечить раздельное хранение, должно быть обеспечено хорошее перемешивание при заполнении емкости. Высокое содержание азота в СПГ также может вызвать ролловер вскоре после прекращения заполнения емкости вследствие преимущественного испарения азота. Этот тип ролловера можно предотвратить путем поддержания содержания азота в СПГ менее 1 % и при тщательном мониторинге скорости образования отпарного газа.

При контакте двух жидкостей с разными температурами при определенных условиях могут возникать ударные волны за счет быстрого фазового перехода (БФП). Это явление может происходить при контакте СПГ и воды. Несмотря на то что при этом не происходит воспламенение, создается волна давления, похожая на взрыв. Механизм явления заключается в следующем. Когда две жидкости со значительно отличающимися температурами вступают в контакт и температура (в градусах Кельвина) более теплой жидкости в 1,1 раза выше, чем температура кипения более холодной жидкости, повышение температуры последней происходит настолько быстро, что температура поверхностного слоя может превысить температуру начала гомогенной нуклеации (взрывное испарение жидкости).

Ниже будут проанализированы публикации, посвященные изучению указанных явлений.

Исследования эффекта ролловера

В работе [2] методом моделирования CFD изучен процесс возникновения ролловера. Отмечено, что с 1960 г. имели место по крайней мере 24 инцидента с реализацией данного явления в резервуарах хранения СПГ. При инициировании ролловера из-за теплопритока от стенок резервуара стратифицированный сжиженный газ может внезапно гомогенизироваться с образованием большого количества пара. При этом возрастает давление в резервуаре во взрывном режиме, которое должно стравливаться в атмосферу с образованием газового облака. Для описания этого процесса разработана математическая модель, которая верифицирована с помощью среднемасштабного эксперимента по образованию ролловера. Модель также использована для описания имевшего место крупномасштабного инцидента в Ла-Специя [1].

В работе [3] рассмотрены основные закономерности возникновения ролловера. Отмечено, что ролловер — процесс взрывного вскипания в результате физического смешивания двух и более частей СПГ, имеющих различный состав, температуру и плотность. Вскипание сопровождается образованием большого количества паров и повышением давления в резервуаре, что представляет угрозу целостности резервуара. Возможные последствия ролловера при отсутствии мер по его предотвращению состоят в неконтролируемом выбросе паров через предохранительные клапаны с образованием взрывоопасной атмосферы вблизи резервуара и даже в нарушении его герметичности. Предлагаемые меры по предотвращению ролловера зачастую недостаточны в силу следующих причин: 1) резервуары не рассчитаны на давление, возникающее при реализации ролловера; 2) резервуары не оснащены оборудованием для предотвращения ролловера; 3) большинство резервуаров не оснащено датчиками плотности СПГ по высоте резервуара. Работа [3] рассматривает механизм возникновения ролловера на основе анализа 20 инцидентов, в которых на практике наблюдалось это явление. Предложена новая методология оценки параметров ролловера. Это позволяет применить необходимые меры по предотвращению ролловера и предложить соответствующие защитные мероприятия. Предложен метод прогнозирования времени возникновения ролловера, температуры СПГ и давления его паров в резервуаре.

Для возникновения ролловера необходимым условием является образование слоев продукта с различными плотностями и температурами (стратификация жидкой фазы СПГ). Явление стратификации неизбежно из-за тепловых потоков от стенок резервуара даже для однородного продукта, причем

чем выше величина этих потоков, тем больше степень стратификации. Выполнено численное моделирование явления стратификации и проведены экспериментальные исследования с использованием вместо СПГ жидкого азота, близкого к сжиженному природному газу по физическим свойствам. Эксперимент выполнен на лабораторной установке в виде вертикального цилиндра диаметром 130 и высотой 800 мм. Для регистрации слоев продукта по высоте цилиндра через каждые 20 мм размещались термопары. Начальный уровень заполнения резервуара жидкостью составлял 30, 50 или 80 % от его высоты. Изучено влияние уровня заполнения резервуара на скорость испарения продукта. Найдено, что чем больше уровень заполнения, тем выше скорость испарения. Математическая модель стратификации СПГ в резервуаре предложена в работе [5].

Роль стратификации в возникновении эффекта ролловера изучена в работе [6]. Если в резервуаре присутствуют два слоя продукта (например, при загрузке в резервуар с остатками СПГ новой партии продукта) и верхний слой имеет более высокую температуру, то нагрев более холодного нижнего слоя от стенок и днища не приведет до определенного момента времени к возникновению конвективных течений, перемешивающих слои. В этом случае теплообмен между слоями осуществляется только через их границу за счет теплопроводности. Это приводит к перегреву нижнего слоя, так как теплоотвод от него ограничен из-за устранения конвективных потоков, а подвод тепла от стенок и днища продолжается. Плотность верхнего слоя увеличивается благодаря преимущественному испарению из него легких компонентов (метан, азот) с увеличением для более тяжелых углеводородов, неизбежно содержащихся в СПГ. При этом плотность верхнего слоя увеличивается и приближается к плотности нижнего слоя, которая падает за счет нагрева. Когда плотности слоев выравниваются, происходит их быстрое перемешивание с быстрым испарением нижнего перегретого слоя и с повышением давления в резервуаре.

Проведен лабораторный эксперимент по моделированию ролловера в горизонтальном сосуде длиной 20 см с сечением 12×12 см с одной прозрачной стенкой. Боковые стенки и днище сосуда обогревали электрическим нагревателем. В качестве различных модификаций СПГ использовали хладон 11 в верхнем слое и смесь хладонов 11 и 113 в нижнем. Для визуализации процесса в сжиженные газы подмешивали твердые частицы. Найдено, что в первые 15 мин ясно видна граница раздела слоев. В следующие 30 мин все большее количество жидкостей вовлекаются в конвективные потоки, в результате чего в верхнем слое образуется конвективный кон-

тур. Граница раздела слоев при этом практически не сдвигается. Далее — до времени 185 мин — граница слоев перемещается вниз и становится более размытой. Через 185 мин наблюдается интенсивное перемешивание слоев, т.е. ролловер.

Работа [7] посвящена оценке времени возникновения ролловера в резервуарах хранения СПГ на основе моделирования с использованием CFD. Отмечено, что за последние 60 лет зафиксировано 24 случая ролловера на стационарных резервуарах. За последние 10 лет более 20 случаев имели место на плавучих терминалах хранения и регазификации СПГ. Инциденты на таких резервуарах случаются чаще, чем на стационарных, и риск таких явлений выше.

Работа посвящена разработке CFD-кода для предсказания ролловера и его апробации на основе анализа имевших место аварий. Необходимым условием возникновения ролловера является стратификация жидкой фазы СПГ, которая чаще всего имеет место в результате подачи более плотного («холодного») продукта под менее плотный («теплый») продукт или «теплого» продукта на «холодный». За счет притока тепла от стенок резервуара инициируются конвективные потоки в каждом из слоев, за счет чего ограничивается теплообмен между слоями. Верхний («теплый») слой охлаждается за счет преимущественного испарения легколетучих компонентов (метан, азот), а нижний («холодный») слой нагревается от стенок. При выравнивании плотностей слоев происходит их взрывообразное смешение с высвобождением энергии перегретого нижнего слоя и вскипанием продукта, сопровождающимся скачком давления. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с данными анализа аварии в Ла-Специя [1] и экспериментами [8, 9]. Расчет занимает 200–440 ч машинного времени при реальном времени возникновения ролловера 60–70 ч. Получено хорошее согласие результатов расчета с экспериментальными данными.

В работе [10] выполнено моделирование ролловера в резервуаре хранения СПГ с целью определения порога возникновения этого явления. Дано качественное описание возникновения данного явления. В больших регазификационных терминалах сжиженный природный газ зачастую поступает из разных источников, имея различные температуры, плотности и составы. При заливке «свежего» продукта в резервуар, где содержится «старый» продукт, происходит стратификация слоев, в каждом из которых возникают конвективные потоки за счет нагрева от стенок и днища резервуара. С течением времени жидкость верхнего слоя становится более плотной за счет преимущественного испарения легколетучих компонентов (метан, азот). При этом

гидростатическое давление верхнего слоя препятствует испарению нижнего слоя, в результате чего нижний слой перегревается и становится менее плотным. Когда плотности слоев выравниваются, их граница раздела становится нестабильной с дальнейшим быстрым перемешиванием слоев, и происходит взрывообразное вскипание нижнего перегретого слоя с соответствующим ростом давления в резервуаре. Отмечены две широко известные аварии с реализацией ролловера [1, 11].

Проведено численное моделирование возникновения ролловера в резервуарах хранения СПГ с объемами 160 000, 30 000 и 5000 м³ (диаметры 80, 42 и 22 м соответственно). Обнаружены флуктуации параметров жидкостей на границе раздела слоев. Для резервуара объемом 160 000 м³ найдено, что, если разница плотностей продуктов в соседних слоях менее 3 кг/м³, ролловер возникает с большой задержкой и происходит в квазистационарном режиме в течение длительного времени. При разнице плотностей более 3 кг/м³ ролловер происходит через значительно более короткое время и может характеризоваться серьезными последствиями. Для резервуаров объемом 30 000 и 5000 м³ пороговые значения разности плотностей составляют 5 и 7 кг/м³ соответственно. Критические значения разности температур ΔT_c слоев составляют 2,22, 3,70 и 5,18 К соответственно. Для величины ΔT_c (К) получена формула:

$$\Delta T_c = -0,855 \cdot \ln V + 12,48,$$

где V — объем резервуара, м³.

В работе [12] описана модель ролловера в резервуаре хранения СПГ на основе рассмотрения данного явления с учетом условного разделения продукта на множество слоев. Проанализирована природа явления, обусловленного стратификацией хранящегося сжиженного газа при подаче в резервуар продуктов разной плотности и температуры с дальнейшим разрушением поверхности раздела с вскипанием жидкой фазы. Результаты расчета по предложенной модели удовлетворительно согласуются с данными эксперимента [13].

В стандарте EN 1473:2021 «Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installation» изложены требования по предотвращению ролловера в резервуарах хранения СПГ:

- налив «свежих» партий СПГ в нижнюю часть резервуара с перемешиванием продукта;
- применение системы рециркуляции для предотвращения стратификации жидкой фазы;
- контроль скорости испарения;
- измерение температуры и плотности жидкости по высоте резервуара;

- предотвращение одновременного хранения в одном резервуаре различных партий СПГ;
- загрузка СПГ в резервуар с учетом плотностей различных партий продукта;
- поддержание концентрации сжиженного азота в СПГ не более 1 %;
- контроль температуры внешней поверхности стенки внутреннего резервуара, включая днище (за исключением резервуаров мембранного типа);
- контроль утечек продукта в межстенное пространство;
- контроль градиента температуры наружной бетонной стенки.

Исследования эффекта быстрого фазового перехода

Как отмечено выше, БФП происходит при проливе СПГ на водную поверхность. Особенности этого процесса рассмотрены в работах [14, 15].

В работе [14] рассматривается специфика и динамика аварийного истечения СПГ из грузовых емкостей танкера с пробойной на ватерлинии, над водой и под водой. Проанализированы тепломассообменные процессы при попадании СПГ и воды в межкорпусное пространство танкера. Установлено, что при истечении СПГ в толщу воды будет происходить распад струи и испарение капель продукта, а на поверхности воды будет наблюдаться только бурлящее газожидкостное пятно. При истечении СПГ над водой будет происходить частичный распад струи на отдельные фрагменты (капли) с последующим попаданием струи в толщу воды и испарением продукта. При пробое корпуса танкера на уровне ватерлинии будут происходить растекание слоя СПГ на поверхности воды и формирование источника генерации паров.

В работе [15] рассмотрена специфика термодинамических и тепломассообменных процессов при аварийных разливах СПГ на водной поверхности. При этом возможен эффект быстрого фазового перехода (БФП), с характерным квазимгновенным вскипанием СПГ. Ранее данный эффект был исследован в Ливерморской национальной лаборатории (Lawrence Livermore National Laboratory — LLNL) (США) [16–20]. Отмечено, что в случае пролива СПГ на поверхность воды при отсутствии смешения жидкостей БФП протекает по механизму взрывного вскипания в объеме перегретой жидкости. Установлено, что характеристики эффекта БФП зависят от компонентного состава СПГ (наличия более тяжелых углеводородов), температуры воды, специфики аварийного разлива СПГ (перемешивание с водой) и ряда других факторов. Обобщены аналитические модели расчета параметров процесса.

В монографии [21] отмечено наличие БФП в упомянутой выше серии экспериментов BURRO. В серии из четырех опытов по разлитию СПГ на поверхность воды в двух наблюдался БФП. На расстоянии 30 м от места инициирования разлития зафиксировано давление 5 кПа, что свидетельствует о взрывном характере испарения СПГ. При этом размер взрывоопасной зоны по уровню НКПР при наличии БФП намного выше, чем при отсутствии этого процесса. Об этом свидетельствуют следующие результаты (см. таблицу).

Видно, что в двух последних экспериментах размер взрывоопасной зоны существенно больше, хотя количество пролитого СПГ меньше, чем в первых двух экспериментах. Причиной этого является реализация БФП в двух последних опытах.

В работе [22] теоретически изучено возникновение БФП при проливе СПГ на поверхность воды. При этом может реализоваться быстрый фазовый переход, происходящий во взрывном режиме при контакте двух жидкостей. Энергия, выделяющаяся при взрывном испарении, и давление в образующейся при этом ударной волне зависят от ряда факторов, таких как скорость истечения СПГ, локализация источника истекающего продукта (над или под уровнем воды), параметры окружающей среды, состав СПГ, температура воды. В работе описана математическая модель для определения энергии взрыва и давления в ударной волне. Найдено, что вероятность возникновения БФП определяется такими параметрами, как температура и состав СПГ, температура воды на ее поверхности и в глубине, площадь контакта СПГ и воды, интенсивность теплообмена на границе раздела жидкостей. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными¹. В данном эксперименте изучали крупномасштабные проливы СПГ (скорость истечения до 100 м³/мин) на поверхность воды. Было найдено, что опасные для целостности зданий и сооружений значения давления в ударной волне наблюдаются на расстояниях 250–500 м от места пролива.

Размеры взрывоопасной зоны для различных объемов выброса СПГ

Dimensions of the explosive zone for different volumes of LNG emissions

Объем разлития, м ³ Spill volume, m ³	Размер взрывоопасной зоны, м The size of the explosive zone, m
34,0	255
39,4	200
28,4	420
24,2	325

¹ Guidance on risk analysis and safety implications of a large liquid natural gas (LNG) spill over water. Albuquerque, Sandia National Laboratory, SAND2004-6258, 2004.

В работе [23] дан обзор теоретических и экспериментальных работ по изучению БФП. Отмечено, что БФП реализуется, как правило, по прошествии промежутка времени более 1 мин с начала истечения продукта. Максимальный ТНТ-эквивалент для ударной волны составил 6,3 кг при скорости истечения 18 м³/мин. Найдено, что скорость истечения продукта является основным параметром, определяющим величину давления взрыва. Резкое увеличение ТНТ-эквивалента зафиксировано при скорости истечения 15 м³/мин. При этом горизонтальный размер взрывоопасной зоны возрастает на 65 %. Вероятность возникновения БФП зависит от температуры воды и глубины места истечения СПГ под ее поверхность. Отсюда вытекает эмпирическое правило, которое может быть записано следующим образом:

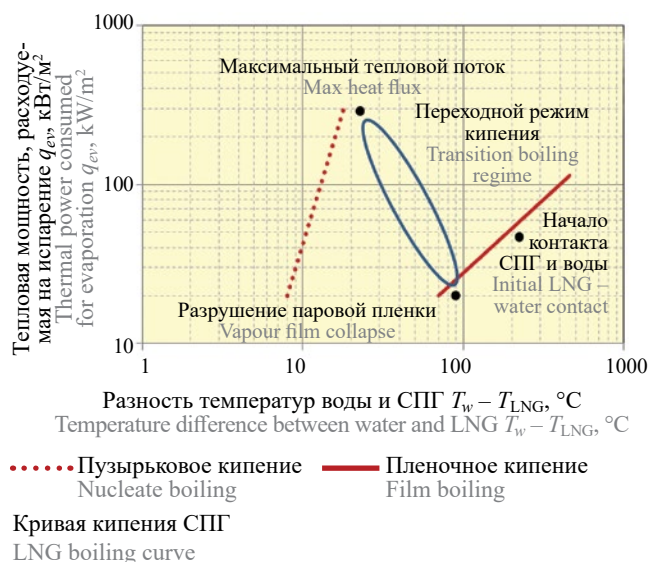
$$T_{SH} < T_w < 1,1T_{SH},$$

где T_{SH} — предельная температура перегрева, выше которой кипение жидкости происходит в режиме гомогенной нуклеации (т.е. во взрывном режиме). Величина T_{SH} составляет 168, 269, 326 и 376 К для метана, этана, пропана и бутана соответственно. Найдено, что лишь небольшая часть энергии перегрева переходит в энергию ударной волны.

Работа [24] посвящена анализу исследований опасности пролива СПГ на поверхность воды, в том числе рассмотрению БФП с оценкой размеров образующегося газового облака и параметров ударной волны. Рассматривается сценарий, когда судно, перевозящее СПГ, сливает газ в плавучее хранилище, и заправочный рукав обрывается. Происходит истечение продукта с расходом 1020 кг/с длительностью 76 с на высоте 20 м от поверхности воды. Состав СПГ: метан — 78,76 %, этан — 12,31 %, пропан — 8,93 %. Температура воды и воздуха 25 °С, скорость ветра 0,5 м/с.

Отмечено, что БФП является результатом перегрева слоя СПГ на поверхности воды до температуры, превышающей предельную температуру перегрева T_{SH} , выше которой испарение происходит в режиме гомогенной нуклеации. При достижении температуры жидкой фазы T_{SH} аккумулированная в жидкости энергия высвобождается во взрывном режиме с образованием ударной волны.

При контакте СПГ с водой разница температур ΔT двух жидкостей уменьшается, и при достижении величиной ΔT значения 80 К происходит резкая смена режима кипения СПГ с пленочного на пузырьковый с соответствующим ростом скорости испарения (см. рисунок). Величина давления ударной волны вблизи места возникновения БФП может достигать значения 110 кПа, при этом



образуется облако паров СПГ. В начальной стадии распространения облака оно имеет отрицательную плавучесть и распространяется горизонтально. При температуре парового облака выше 164 К оно приобретает положительную плавучесть.

Выводы

В настоящей работе дан обзор исследований, посвященных изучению пожарной опасности взрывных режимов испарения СПГ, таких как ролловер и быстрый фазовый переход. Показано, что реализация данных режимов приводит к существенному повышению уровня пожарной опасности объектов хранения и транспортировки СПГ. Ролловер может привести к разрушению резервуаров хранения СПГ, а быстрый фазовый переход — к возникновению ударной волны и увеличению размеров парового облака при проливе продукта на водную поверхность. Сформулированы мероприятия по предотвращению ролловера. Основным способом предотвращения быстрого фазового перехода является недопущение проливов СПГ на водную поверхность с расходом выше 10 м³/мин. Данные рекомендации предлагаются учесть при совершенствовании нормативных документов по пожарной и промышленной безопасности объектов хранения и транспортировки сжиженного природного газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sarsten J.A. LNG stratification and rollover // Pipeline Gas Journal. 1972. Vol. 199. Issue 11. Pp. 37–39.
2. Kulitsa M., Wood D.A. LNG rollover challenges and their mitigation on Floating Storage and Regasification Units: New perspectives in assessing rollover consequences // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 54. Pp. 352–372. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.007
3. Kulitsa M., Wood D.A. Floating storage and regasification units face specific LNG rollover challenges: Consideration of saturated vapor pressure provides insight and mitigation options // Natural Gas Industry B. 2018. Vol. 5. Issue 4. Pp. 391–414. DOI: 10.1016/j.ngib.2018.05.001
4. Minsuk Kang, Juwon Kim, Hwalong You, Daejun Chang. Experimental investigation of thermal stratification in cryogenic tanks // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 96. Pp. 371–382. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.017
5. Yeonpyeong Jo, Kyeonseok Shin, Sungwon Hwang. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy // Energy. 2021. Vol. 223. P. 120060. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120060
6. Shi J.Q., Bedu Z.C., Scurlock R.G. Numerical modelling and flow visualization of mixing of stratified layers and rollover in LNG // Cryogenics. 1993. Vol. 33. Issue 12. Pp. 1116–1124. DOI: 10.1016/0011-2275(93)90004-8
7. Hubert A., Dembele S., Denissenko P., Wen J. Predicting liquefied natural gas (LNG) rollovers using computational fluid dynamics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. Pp. 103922. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103922
8. Bates S., Morrison D.S. Modelling the behaviour of stratified liquid natural gas in storage tanks: A study of the rollover phenomenon // International journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 8. Pp. 1875–1884. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00218-9
9. Gorieu O., Uznanski D., DuPont P. How to operate LNG terminals with flexibility/safety despite the diversification of unloaded LNG qualities // 14th International Conference and Exhibition of Liquefied Natural Gas. 2004. Pp. 1–10.
10. Li Y., Li Z., Wang W. Simulating on rollover phenomenon in LNG storage tanks and determination of the rollover threshold // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 37. Pp. 132–142. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.07.007
11. Baker N., Greed M. Stratification and rollover in liquefied natural gas storage tank // Process Safety and Environmental Protection. 1996. Vol. 74 (B1). Pp. 25–30.
12. Wang Z., Sharafian A., Merida W. Thermal stratification and rollover phenomena in liquefied natural gas tanks // Energy. 2021. Vol. 238. P. 121994. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121994
13. Perez F., Saif Z.S., Al Ghafn, Gallagher L., Siahvashi A., Yoghee Ryu et al. Measurements of boil-off gas and stratification in cryogenic liquid nitrogen with implications for the storage and transport

- of liquefied natural gas // *Energy*. 2021. Vol. 222. P. 119853. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119853
14. Люгай Д.В., Сафонов В.С. Обоснование возможных сценариев и оценка последствий утечек сжиженного природного газа при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров // *Вести газовой науки*. 2018. № 2 (34). С. 166–176. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35311625>
 15. Сафонов В.С. Об особенностях эффекта быстрого фазового перехода при аварийных разливах СПГ на водной поверхности // *Вести газовой науки. Научно-технический сборник*. 2018. № 4 (36). С. 105–114. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37057115>
 16. McRaf T.G., Goldwire H.C., Koopman R.P. Analysis of large scale LNG/water RPT explosions. Livermore : LLNL, 1984. UCRL 91832.
 17. McRaf T.G. Preliminary analysis of RPT explosions observed in the LLNL/NWC LNG spill tests. Livermore : LLNL, 1982. UCRL 87564.
 18. Ermak D.L., Koopman R.P., McRaf T.G. et al. LNG spill experiments: Dispersion, RPT and vapor burn analysis // *Proceedings of the American Gas Association Section*. Washington, 1982. Pp. T203–T209.
 19. Ermak D.L., Koopman R.P. Results of 40 m³ LNG spill onto water // *Heavy gas and risk assessment. II: Proceedings of the Second Symposium on Heavy Gas and Risk Assessment*. Frankfurt am Mine, May 25–26, 1982. 1982. Pp. 163–179.
 20. Morgan D.L., McRaf T.G., Goldwire H.C. et al. Dispersion phenomenology of LNG vapor in the BURRO and COYOTE LNG spill experiments. Livermore : LLNL, 1987. UCRL 91741.
 21. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М. : Мир, 1989. 671 с.
 22. Bubbico R., Salzano E. Acoustic analysis of blast waves produced by rapid phase transition of LNG released on water // *Safety Science*. 2009. Vol. 47. Pp. 515–521.
 23. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 132. Pp. 119–140.
 24. Horvat A. CFD methodology for simulation of LNG spills and rapid phase transition (RPT) // *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. Vol. 120. Pp. 358–369. DOI: 10.1016/j.psep.2018.09.025

REFERENCES

1. Sarsten J.A. LNG stratification and rollover. *Pipeline Gas Journal*. 1972; 199(11):37-39.
2. Kulitsa M., Wood D.A. LNG rollover challenges and their mitigation on Floating Storage and Regasification Units: New perspectives in assessing rollover consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 54:352-372. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.007
3. Kulitsa M., Wood D.A. Floating storage and regasification units face specific LNG rollover challenges: Consideration of saturated vapor pressure provides insight and mitigation options. *Natural Gas Industry B*. 2018; 5(4):391-414. DOI: 10.1016/j.ngib.2018.05.001
4. Minsuk Kang, Juwon Kim, Hwalong You, Daejun Chang. Experimental investigation of thermal stratification in cryogenic tanks. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 96:371-382. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.017
5. Yeonpyeong Jo, Kyeonseok Shin, Sungwon Hwang. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy. *Energy*. 2021; 223:120060. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120060
6. Shi J.Q., Bedu Z.C., Scurlock R.G. Numerical modeling and flow visualization of mixing of stratified layers and rollover in LNG. *Cryogenics*. 1993; 33(12):1116-1124. DOI: 10.1016/0011-2275(93)90004-8
7. Hubert A., Dembele S., Denissenko P., Wen J. Predicting liquefied natural gas (LNG) rollovers using computational fluid dynamics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103922. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103922
8. Bates S., Morrison D.S. Modelling the behaviour of stratified liquid natural gas in storage tanks: A study of the rollover phenomenon. *International journal of Heat and Mass Transfer*. 1997; 40(8):1875-1884. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00218-9
9. Gorieu O., Uznanski D., DuPont P. How to operate LNG terminals with flexibility/safety despite the diversification of unloaded LNG qualities. *14th International Conference and Exhibition of Liquid Natural Gas*. 2004:1-10.
10. Li Y., Li Z., Wang W. Simulating on rollover phenomenon in LNG storage tanks and determination of the rollover threshold. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 37:132-142. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.07.007
11. Baker N., Greed M. Stratification and rollover in liquefied natural gas storage tank. *Process Safety and Environmental Protection*. 1996; 74(B1):25-30.
12. Wang Z., Sharafian A., Merida W. Thermal stratification and rollover phenomena in liquefied natural gas tanks. *Energy*. 2021; 238:121994. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121994
13. Perez F., Saif Z.S., Al Ghafn, Gallagher L., Siahvashi A., Yoghee Ryu et al. Measurements of boil-off gas and stratification in cryogenic liquid nitrogen with implications for the storage and transport of liquefied natural gas. *Energy*. 2021; 222:119853. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119853

14. Lyugay D.V., Safonov V.S. Substantiation of possible scenarios and assessment of liquefied natural gas spillage aftereffects at accidental tightness violation of tanker cargo reservoirs. *Vesti gazovoy nauki*. 2018; 2(34):166-176. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35311625> (rus).
15. Safonov V.S. On peculiarities of a rapid phase transition effect during accidental spillages of liquefied natural gas over a water table. *Vesti gazovoy nauki*. 2018; 4(36):105-114. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37057115> (rus).
16. McRaf T.G., Goldwire H.C., Koopman R.P. *Analysis of large scale LNG/water RPT explosions*. Livermore, LLNL, 1984. UCRL 91832.
17. McRaf T.G. *Preliminary analysis of RPT explosions observed in the LLNL/NWC LNG spill tests*. Livermore, LLNL, 1982. UCRL 87564.
18. Ermak D.L., Koopman R.P., McRaf T.G. et al. LNG spill experiments: Dispersion, RPT and vapor burn analysis. *Proceedings of the American Gas Association Section*. Washington, 1982; T203-T209.
19. Ermak D.L., Koopman R.P. Results of 40 m³ LNG spill onto water. *Heavy gas and risk assessment. II: Proceedings of the Second Symposium on Heavy Gas and Risk Assessment*. Frankfurt am Main, May 25–26, 1982. 1982; 163-179.
20. Morgan D.L., McRaf T.G., Goldwire H.C. et al. *Dispersion phenomenology of LNG vapor in the BURRO and COYOTE LNG spill experiments*. Livermore, LLNL, 1987. UCRL 91741.
21. Marshall V. *The main dangers of chemical production*. Moscow, Mir Publ., 1989; 671. (rus).
22. Bubbico R., Salzano E. Acoustic analysis of blast waves produced by rapid phase transition of LNG released on water. *Safety Science*. 2009; 47:515-521.
23. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 132:119-140.
24. Horvat A. CFD methodology for simulation of LNG spills and rapid phase transition (RPT). *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 120:358-369. DOI: 10.1016/j.psep.2018.09.025

Поступила 12.12.2022, после доработки 09.01.2023;

принята к публикации 16.01.2023

Received December 12, 2022; Received in revised form January 9, 2023;

Accepted January 16, 2023

Информация об авторе

Шебеко Юрий Николаевич, 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; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the author

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ пожарной опасности различных типов литий-ионных аккумуляторов. Представлены варианты реализации пассивного тушения (охлаждения) поврежденных ячеек и способов создания невоспламеняемых составов электролита. Выполнено обобщение возможных технических решений по снижению вероятности распространения пожара на соседние ячейки в пределах отдельной упаковки. Рассмотрены возможные пути предотвращения и снижения последствий воспламенения аккумуляторных батарей с использованием различных огнетушащих веществ. Дано описание основных особенностей применения и принципов действия современных способов тушения литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова: теплопроводность; изоляция; микрокапсулирование; пена; порошок; вода; емкость; удельная энергоемкость; удельная мощность; электроды; горение; взрыв; температура

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

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

The fire hazard of various types of lithium-ion batteries was analyzed. Options for implementing passive extinguishing (cooling) of damaged cells and methods of creating non-flammable electrolyte compounds were presented. The author summarized possible engineering solutions, aimed at reducing the likelihood of fire spread to neighbouring cells within a separate pack. The author also considered ways of preventing and mitigating battery ignition consequences using various fire extinguishing substances, described the main features of application and operating principles underlying advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries.

Keywords: thermal conductivity; insulation; micro-capsulation; foam; powder; water; capacity; specific energy; specific power; electrodes; burning; explosion; temperature

For citation: Kharlamenkov A.S. Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):89-96 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС

В рубрике «Вопрос–ответ» журналов № 4 и 5 за 2022 г. [1, 2] были представлены варианты реализации внутренних и внешних систем защиты от аварийных режимов работы как единичных элементов питания (ячеек), так и аккумуляторных сборок.

Обе системы позволяют обеспечить снижение риска возникновения пожара (взрыва) по причине неисправности литиевых аккумуляторных батарей, но не способны полностью устранить их пожаро-

взрывоопасность. В случае воспламенения отдельных ячеек аккумуляторной сборки присутствует угроза распространения горения на соседние элементы. Поэтому применение современных технических средств тушения и ограничения развития пожара, относящихся к системе противопожарной защиты, позволяет минимизировать последствия аварийного режима работы аккумуляторов и снизить ущерб от их воспламенения.

Какие же способы тушения литиевых аккумуляторов применяют на сегодняшний день?

Таблица 1. Результаты испытаний различных типов литиевых аккумуляторов

Вид испытаний	Тип аккумулятора			
	Li-Pol	NMC	LTO	LFP
	Результаты испытания			
Перезаряд/Внешнее короткое замыкание	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вскрытие предохранительного клапана с выбросом электролита без воспламенения	Вздутие корпуса со вскрытием предохранительного клапана без воспламенения
Сквозное механическое повреждение корпуса	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Выброс электролита без воспламенения	Вздутие корпуса с выбросом дыма, внутреннее тление
Вывод	Высокая пожароопасность	Высокая пожароопасность	Низкая пожароопасность	Средняя пожароопасность

ОТВЕТ

По состоянию на 2022 г. наибольшее распространение получили следующие типы аккумуляторов: литий-полимерный (Li-Pol); литий-никель-марганец-кобальт-оксидный (LiNiMnCoO₂, NMC); литий-титанатный (Li₄Ti₅O₁₂, LTO); литий-железо-фосфатный (LiFePO₄, LFP). Многие иностранные организации (FM Global, GWL и др.), занимающиеся вопросами обеспечения безопасной эксплуатации литиевых аккумуляторов, проводили ряд испытаний по анализу состояния аккумуляторов в случае перезаряда, короткого замыкания, механического повреждения и внешнего огневого воздействия. По результатам было установлено, что наибольшую пожарную опасность представляют Li-Pol и NMC аккумуляторы (табл. 1).

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний, представленных в табл. 1, проводились на аккумуляторах, не имеющих систем защиты в виде внешних BMS плат. Условия испытаний выходили за пределы требований ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ и ГОСТ Р МЭК 62281–2020² и рассматривались для случаев нарушения нормального технологического процесса хранения, транспортировки и эксплуатации.

Для снижения пожарной опасности существующих литий-ионных аккумуляторов ведется постоянный поиск более безопасных конструкций и составов электролита. Для аккумуляторов, выполненных в призматическом корпусе, в качестве внешнего покрытия используют эластомеры [3]. При вздутии аккумулятора они способ-

ны значительно расширяться без потери целостности корпуса, кроме места размещения предохранительного клапана. Тем самым обеспечивается исключение взрыва и разрушения корпуса аккумулятора с последующим открытым горением.

Научное сообщество ведет активный поиск различных наименее пожароопасных составов электролита. Общая стратегия разработки невоспламеняемых растворов заключается в использовании компонентов электролита, замедляющих горение, или полной замене пожароопасных растворителей на основе карбонатов, таких как диметилкарбонат, диэтилкарбонат, этиленкарбонат, пропиленкарбонат. Известно, что замена растворителей на серо-, фтор-, фосфоросодержащие снижает воспламеняемость компонентов электролита [4]. Последние исследования в этой области [5, 6] позволили получить полимерный электролит в жидком состоянии, состоящий из гидрофильных солей лития (LiFSI) и растворителей на основе диметоксизтана (DME) и полисилоксана (силикона). Такой состав позволяет предотвращать испарение электролита при высоких температурах (100 °C) и исключить его воспламенение.

Немаловажное значение имеет и формат упаковки аккумуляторных батарей при их хранении и транспортировке. Было проведено исследование различных вариантов упаковки аккумуляторов цилиндрической формы³. В качестве перегородок-разделителей между соседними ячейками применяли: гофрированный картон; картон, обработанный вспучивающейся краской; алюминиевые пластинки; плоский мешочек с водой, укладываемый поверх всех ячеек с картонными перегородками. Результаты испытаний показали высокую эффективность алюминиевых пластин и мешочка с водой по снижению передачи тепла от неисправной ячейки к соседним. Применение алюминиевых пластин в качестве перегородок является достаточно дорогостоящим решением для выполнения упаковки в отличие

¹ ГОСТ Р МЭК 62619–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Аккумуляторные и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей для промышленных применений : введен в действие 01.09.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

² ГОСТ Р МЭК 62281–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Первичные и вторичные литиевые элементы и батареи. Безопасность при транспортировании. Требования и методы испытаний : введен в действие 01.03.2021. М. : Стандартинформ, 2020.

³ DOT/FAA/TC-15/38. Passive protection of lithium battery shipments. Final Report // U.S. Department of Transportation. 2016. 34 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.14208.35841

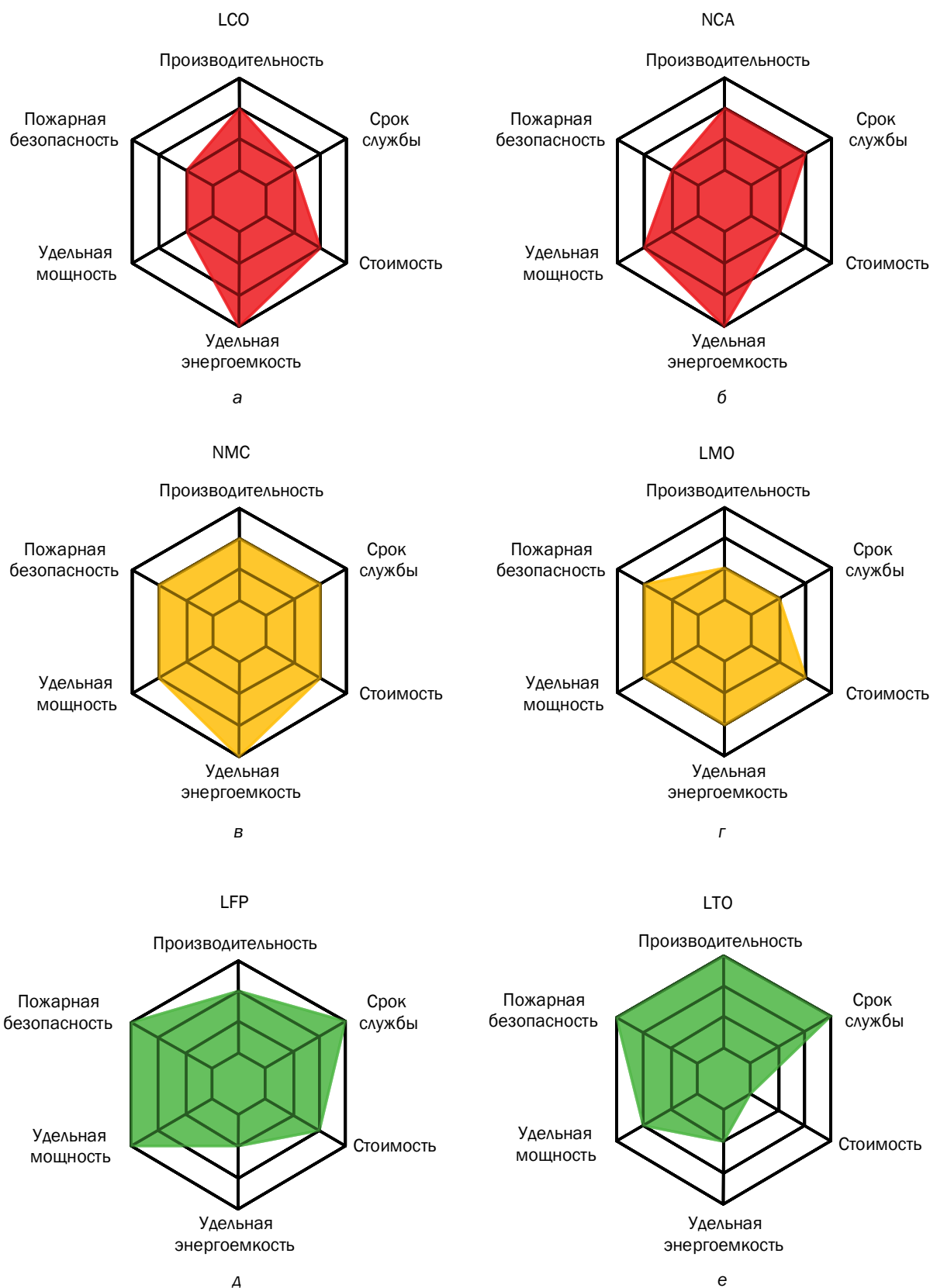


Рис. 1. Распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов: а — литий-кобальтовые; б — литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные; в — литий-никель-марганец-кобальт-оксидные; г — литий-марганцево-оксидные; д — литий-железо-фосфатные; е — литий-титанат-оксидные

от мешочка с водой, который можно рассматривать в качестве пассивного тушения (охлаждения) неисправной ячейки.

Обобщая все положительные и отрицательные параметры различных литий-ионных аккумуляторов (рис. 1), можно сделать вывод, что варианты исполнения LTO и LFP представляют наименьшую пожарную опасность.

В современных аккумуляторах количество «чистого» лития достаточно мало (2–3 % от общей массы ячейки) и составляет в среднем 0,08 г на 1 Вт·ч энергии или 80 г на 1 кВт·ч. Эту массу называют эквивалентным содержанием лития (LEC).

Представляется возможным оценить LEC (в граммах) для одной аккумуляторной ячейки по формуле:

$$m_{\text{LEC}} = 0,3 \cdot Q,$$

где 0,3 — коэффициент, г/(А·ч);

Q — номинальная емкость одной аккумуляторной ячейки, А·ч.

Тогда в единичном элементе питания емкостью 2600 мА·ч будет содержаться около 0,78 г лития. В случае рассмотрения аккумуляторной батареи, состоящей из 6 аналогичных элементов (ноутбук), масса лития составит 4,7 г. Указанная выше формула для оценки LEC была представлена в старой редакции ГОСТ Р МЭК 62281–2007, в новой редакции (ГОСТ Р МЭК 62281–2020) она отсутствует. В то же время в стандарте дано разграничение между большими и небольшими аккумуляторными сборками. В последних суммарное содержание лития всех элементов не должно превышать 500 г или номинальная энергия должна составлять не более 6200 Вт·ч. В таком случае для небольших аккумуляторных сборок на 1 Вт·ч энергии будет приходиться вышеупомянутые 0,08 г лития.

Аккумуляторные батареи электромобилей способны запасать номинальную энергию 40–100 кВт·ч, при этом их масса составляет 300–600 кг. Следовательно, суммарная масса лития в таких батареях составит приблизительно 3,2–8 кг. Остальная масса батареи — это алюминий, графит, никель, медь, пластик и другие материалы (рис. 2).

Следует отметить, что большинство литий-ионных батарей не имеет в своем составе пожароопасного металлического лития в чистом виде. Литий присутствует в виде солей (соединения, получаемые из карбоната лития), являющихся частью электролита и катода (анода) аккумулятора. Например, растворы гексафторфосфата лития LiPF_6 используются в электролите аккумуляторной батареи, оксид лития-кобальта (LiCoO_2) или феррофосфат лития (LiFePO_4) — материал катода,

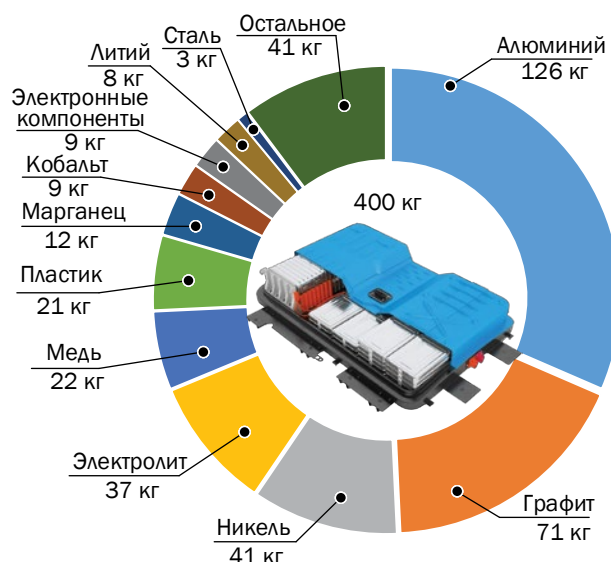


Рис. 2. Приблизительное распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (тип NMC)

а пентатитанат лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) — материал анода. По этой причине горение литий-ионных аккумуляторов не следует однозначно относить к классу пожаров D2 (горение щелочных металлов)^{4, 5}.

В Приложении А.1 к СП 9.13130.2009⁶ для тушения пожаров класса D признаны наиболее эффективными порошковые огнетушители. Также в п. 4.1.4 данного свода правил указано, что «для тушения пожаров класса D огнетушители должны быть заряжены специальным порошком, который рекомендован для тушения данного горючего вещества, и оснащены специальным успокоителем для снижения скорости и кинетической энергии порошковой струи. Параметры и количество огнетушителей определяют исходя из специфики обрабатываемых пожароопасных материалов, их дисперсности и возможной площади пожара». То есть выбор типа и количества специального порошка (объема огнетушителя) должен выполняться индивидуально для каждого конкретного случая, что не дает четкого понимания требований норм по тушению как металлического лития, так и литий-ионных аккумуляторов. Для тушения металлического лития, помимо специальных порошков, могут использоваться флюсы и графит с гидрофобизирующими добавками, а также аргон, позволяющий обеспечить вытеснение воздуха из очага горения [7].

⁴ Федеральный закон Российской Федерации «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в редакции от 14.07.2022) от 22.06.2008 № 123-ФЗ; принят Государственной Думой 04.06.2008.

⁵ ГОСТ 27331–87 (СТ СЭВ 5637-86). Пожарная техника. Классификация пожаров : введен в действие 01.01.1988. М. : Госстандарт СССР, 1988.

⁶ СП 9.13130.2009. Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации : введен в действие 01.05.2009. М. : МЧС России, 2009.

Таблица 2. Список средств пожаротушения, предлагаемых различными производителями литий-ионных аккумуляторов [11]

Компания	Страна	Дата	Форм-фактор аккумулятора	Химия	Вода	CO ₂	Пена	Химический / сухой порошок	Азот	Песок	Все способы тушения
Ideal	США	2010	Ячейка	LCO	–	+	+	+	–	–	–
Yuka energy	Китай	2011	Пакет	LCO	–	+	+	+	–	+	–
Samsung	Корея	2011	Ячейка	NMC	+	–	–	+	–	–	–
Advance Energy	США	2011	–	LCO	–	–	–	–	–	–	+
LG Chem	Корея	2013	Ячейка	NMC	–	–	–	–	–	–	+
Makita	США	2013	Пакет	NCO	+	–	+	+	–	–	–
Bren-Tronics	США	2013	Пакет	LCO	+	+	+	+	–	–	–
Leo Energy	Сингапур	2014	–	NMC	+	–	+	–	–	–	–
Panasonic	США	2015	–	NMC	+	+	+	+	–	–	–
SDPT	Китай	2016	–	LCO	+	+	–	–	–	–	–
IDX	Япония	2016	Пакет	LMO	+	+	+	+	+	–	–
Motorola	США	2017	Пакет	LCO	+	+	+	+	–	–	–
Enertech	Корея	2017	Пакет	NMC	+	–	–	+	–	+	–
Bipower	США	2017	Пакет	LCO	+	+	–	+	–	–	–
Всего					10	8	8	10	1	2	2

Кроме того, в ГОСТ Р 51057–2001⁷ и ГОСТ Р 51017⁸ отсутствует методика проведения огневых испытаний огнетушителей, предназначенных для тушения пожаров класса D, и не разработаны модельные очаги пожара данного класса. Это указывает на необходимость проведения дополнительных исследований и экспериментов в области разработки эффективных способов тушения пожаров литий-ионных аккумуляторов.

Для устранения имеющихся пробелов в нормативной литературе имеет смысл изучить опыт других стран по тушению литий-ионных аккумуляторов. Во многих странах Европы, Северной Америки и в Китае проблема тушения литий-ионных пожаров стоит достаточно остро. Исследования [8] показывают, что горение литий-ионных аккумуляторов нужно рассматривать как пожары «смешанных» классов: А (горение твердых веществ), В (горение жидких веществ); С (горение газообразных веществ); Е (пожары электрооборудования, находящегося под напряжением). Похожая информация содержится и в Приложениях № 1 и 2 Правил противопо-

жарного режима РФ (ППР)⁹. Правилами допускается использовать иные первичные средства пожаротушения (в том числе и другие типы огнетушителей), обеспечивающие тушение соответствующего класса пожара.

Тушение литий-ионных аккумуляторов может осуществляться различными огнетушащими средствами, к которым относятся: сухие порошки; огнетушащие средства на водной основе (в том числе вода); углекислый газ; аэрозоли; химические пены [8, 9]. Выбор типа и количества огнетушащего вещества будет во многом зависеть от размеров аккумуляторных сборок, типов ячеек, особенностей хранения и области их применения.

Пожары с участием литий-ионных аккумуляторов считаются достаточно сложными ввиду повторных возгораний батарей. Это связано с тем, что стандартные способы тушения позволяют снизить температуру в месте горения и временно приостановить химическую реакцию с выделением тепла, но процесс тления во внутреннем корпусе поврежденных ячеек остановить полностью не удастся. В результате через некоторое время потушенный, казалось бы, очаг вновь переходит в активную фазу горения.

⁷ ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний : введен в действие 01.07.2002. М. : Госстандарт России, 2002.

⁸ ГОСТ Р 51017–2009. Техника пожарная. Огнетушители передвижные. Общие технические требования. Методы испытаний (с Поправкой) : введен в действие 01.05.2009. М. : Росстандарт, 2009.

⁹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 21.05.2021) : утв. постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479.

Для случаев горения небольших аккумуляторных сборок, состоящих из небольшого количества элементов (около 2–10 шт.), основной задачей по предотвращению развития пожара является изоляция горящей сборки от других близкорасположенных горючих материалов и последующий контроль полного выгорания батареи. Для этого можно использовать обычный песок или поваренную соль, а также огнеупорные покрывала на основе асбеста, кремнезема, базальта или стекловолокна. В качестве альтернативы обычному песку применяют стеклосодержащий наполнитель¹⁰ с размерами частиц от 0,04 до 2 мм. Применение стеклянных гранул более эффективно, чем обычный песок, за счет меньшего веса и большей заполняющей способности.

В некоторых случаях допускается полное погружение горящей батареи в воду при условии соблюдения мер электробезопасности. В Европе (Германия, Нидерланды) такой способ тушения практикуют при горении аккумулятора электромобиля, полностью погружая последний в емкость с водой [10]. Более подробный разбор способов тушения электромобилей будет рассмотрен в отдельной статье.

Для каждого типа аккумулятора выделяют наиболее эффективные способы тушения. Список наиболее подходящих огнетушащих веществ по данным различных производителей, согласно паспорту безопасности (MSDS) при хранении и транспортировке химической продукции, представлен в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, многие производители рекомендуют выполнять тушение возгораний крупных аккумуляторных сборок распыленной водой, химическими и сухими порошками, CO_2 и пеной.

Вода считается самым экономичным и экологически безопасным способом тушения. Распыление воды имеет самую высокую эффективность охлаждения и успешно подавляет развитие процесса саморазгона соседних ячеек в аккумуляторной сборке и их взрыв [12]. Для LFP аккумуляторов тушение водой нежелательно, так как в результате химической реакции гексафторфосфата лития LiPF_6 с водой выделяется токсичный газ (фтористый водород HF) в диапазоне от 20 до 200 мг/Вт·ч номинальной энергоёмкости батареи [13, 14].

Огнетушащие средства в виде сухих порошков, углекислого газа (CO_2) и хладона (гептафторпропан или HFC-227) способны уменьшить последствия развития теплового разгона, но зачастую не способны полностью остановить повторное возгорание. Сухие порошки для классов пожара ABCE обладают менее выраженным охлаждающим эффектом, чем CO_2 и HFC-227.

Использование пены позволяет охладить и изолировать поверхность горения, но не позволяет обеспечить длительную защиту по причине ее разрушения за счет выброса горючего газа в виде струи при выгорании ячейки литий-ионного аккумулятора.

Важной задачей при тушении литий-ионных аккумуляторов является изолирование поврежденных ячеек и предотвращение передачи тепла к соседним неповрежденным ячейкам.

Среди наиболее перспективных разработок в области тушения литий-ионных аккумуляторов можно отметить варианты с применением хладона Novac 1230 — «сухая вода» ($\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$) в качестве огнетушащего вещества. Он обеспечивает эффективное поглощение тепла и охлаждения очага пожара, поэтому особенно эффективен на ранних стадиях пожара [12]. Так как Novac 1230 представляет собой диэлектрическую жидкость, то позволяет обеспечить работу электрических устройств даже при полном их погружении в вещество. На этом принципе может быть реализована безопасная система охлаждения литий-ионных аккумуляторов, которая может значительно снизить вероятность перегрева ячеек и выбросы опасных газов при воспламенении батареи. Хорошие результаты были получены при тушении NMC аккумуляторов путем распыления водяного тумана вместе с $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ [15]. Комбинированное применение позволило получить более эффективное охлаждение очага пожара по сравнению с применением водяного тумана без добавок.

В последнее время ведутся активные исследования и испытания хладона Novac 1230 в микрокапсулированном виде, например помещенного в оболочку из эпоксидной смолы [16]. Такая форма огнетушащего вещества может применяться в модульных системах хранения электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов. Novac 1230 успешно справляется с тушением пожаров LTO аккумуляторов [17].

Существует надежный способ применения микрокапсул для реализации технологии самозатухающих литий-ионных аккумуляторов в период их теплового разгона. Он основан на введении термочувствительных микрокапсул в электролиты и полиэтиленовый сепаратор литий-ионного аккумулятора, содержащих огнетушащее вещество Novac 7300 (HFE-7300) в виде жидкости, окруженной внешним слоем полиметилметакрилата (ПММА) [18]. При высокой температуре, превышающей 120 °C, ПММА разрушается и высвобождает жидкость, которая активно поглощает тепло. Данная система микрокапсулирования позволяет снизить температуру литий-ионной ячейки до 74 % от стандартного значения.

Механизм тушения на основе мицелярного инкапсулятора F-500 успешно применяется на практике для тушения горящего аккумулятора (в том числе типа LFP) путем распыления огнетушащего состава в очаг пожара [19]. F-500 содержит поверхностно-активное вещество, которое позволяет увеличить общее количество поглощаемого тепла при распылении воды за счет уменьшения размеров водяных капель. Увеличение поглощенного тепла может быть в 6–10 раз больше, чем у чистой воды. Кроме того, группа частиц (мицел) в F-500 позволяет создать изоляционный слой — «хи-

¹⁰ Сайт производителя стеклосодержащего наполнителя. URL: <https://poraver.com/extover/>

мический кокон» вокруг молекул углеводорода, выделяющегося при горении аккумулятора, что снижает его воспламеняемость.

Еще одним достаточно эффективным способом тушения литий-ионных аккумуляторов является применение водной дисперсии вермикулита (AVD), который представляет собой мелкие частицы размером менее 0,18 мм [20]. Пропорции составляют — 17 % вермикулит и 83 % вода. При распылении AVD на литий-ионную ячейку вода охлаждает зону горения, а вермикулит моментально высыхает, образуя пленку, которая отделяет доступ кислорода в очаг пожара.

Таким образом, для тушения литий-ионных аккумуляторов можно использовать воду, химические и сухие по-

рошки, хладоны HFC-227, Noves 1230 и др., огнетушащие микрокапсулы, состав F-500 и водную дисперсию вермикулита (AVD). Каждый способ тушения пожара имеет свои специфические особенности и должен выбираться в зависимости от типа и количества литий-ионных аккумуляторов, условий их эксплуатации, хранения и транспортировки.

Разнообразие способов тушения литий-ионных аккумуляторов позволяет разрабатывать практические рекомендации по оснащению объектов защиты различными первичными средствами тушения и системами пожаротушения на основе рассмотренных огнетушащих веществ. Данные рекомендации следует включать в действующие нормативные документы в области обеспечения пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1142>
2. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1152>
3. Malek S., Christophy M.C., Kole J.M. US Patent No. 8,808,895 B2. August 19, 2014.
4. Ярмоленко О.В., Юдина А.В., Игнатова А.А. Современное состояние и перспективы развития жидких электролитных систем для литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 155–195. DOI: 10.18500/1608-4039-2016-4-155-195 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29289314>
5. Gond R., van Ekeren W., Mogensen R., Naylor A.J., Younesi R. Non-flammable liquid electrolytes for safe batteries // Journal of The Royal Society of Chemistry. 2021. Vol. 8. Issue 11. Pp. 2913–2928. DOI: 10.1039/d1mh00748c
6. Huang Z., Lai J.-C., Kong X., Rajkovic I., Xiao X., Celik H. et al. A solvent-anchored non-flammable electrolyte // Matter. 2022. Vol. 12. Issue 2. Pp. 445–459. DOI: 10.1016/j.matt.2022.11.003
7. Захаров Л.Н. Техника безопасности в химических лабораториях : справ. 2-е изд., перераб. и доп. Л. ; Химия, 1991. 336 с.
8. Kong L., Li C., Jiang J., Pecht M.G. Li-Ion battery fire hazards and safety strategies // Energies. 2018. Vol. 11. Issue 9. P. 2191. DOI: 10.3390/en11092191
9. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В., Иванов Д.В. Обзор огнетушащих средств при тушении литий-ионных батарей // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 33–35. DOI: 10.34987/vestnik.sibrsa.2021.30.61.006
10. Lesiak P., Pietrzela D., Mortkaa P. Methods used to extinguish fires in electric vehicles // Safety & Fire Technology. 2021. Vol. 58. Issue 2. Pp. 38–57. DOI: 10.12845/sft.58.2.2021.3
11. Wilkens K., Johnsen B., Bhargava A., Dragsted A. Project BLUE BATTERY. Part II: Assessment of existing fire protection strategies and recommendation for future work // Fire and security. Danish Technological Institute (DBI). 2017. 37 p. URL: <https://brandogsikring.dk>
12. Zhao J., Xue F., Fu Y., Cheng Y., Yang H., Lu S. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents // iScience. 2021. Vol. 24. Issue 8. P. 102854. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102854
13. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A review of lithium-ion battery fire suppression // Energies. 2020. Vol. 13. Issue 19. P. 5117. DOI: 10.3390/en13195117
14. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Issue 1. P. 10018. DOI: 10.1038/s41598-017-09784-z
15. Liu Y., Duan Q., Xu J., Li H., Sun J., Wang Q. Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 28. P. 101185. DOI: 10.1016/j.est.2019.101185
16. Sertsova A., Krasilnikov S., Lee S.-S., Kim J.-S. The effect of epoxy resin on the properties of encapsulated fire extinguishing agent // Fire Science and Engineering. 2019. Vol. 33. Issue 5. Pp. 19–27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
17. Li Z., Fu Y., Liu A., Li X., Chen G., Qin P. An experimental study on fire suppression devices for power batteries of hybrid electric multiple units // Fire Technology. 2023. DOI: 10.1007/s10694-022-01351-x
18. Yim T., Park M.-S., Woo S.-G., Kwon H.-K., Yoo J.-K., Jung Y.S. et al. Self-extinguishing lithium ion batteries based on internally embedded fire-extinguishing microcapsules with temperature-responsiveness // Nano Letters. 2015. Vol. 15. Issue 8. Pp. 5059–5067. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01167

19. Yuan S., Chang C., Zhang J., Liu Y., Qian X. Experimental investigation of a micelle encapsulator F-500 on suppressing lithium ion phosphate batteries fire and rapid cooling // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 79. P. 104816. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104816
20. Wang H., Sun Q., Guo J., Xie S., He Y., Chen X. The efficiency of aqueous vermiculite dispersion fire extinguishing agent on suppressing three typical power batteries // Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage. 2021. Vol. 18. Issue 2. P. 020901. DOI: 10.1115/1.4048368

Материал поступил в редакцию 30.01.2023

Received January 30, 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 непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предположениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписанной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!