

3-2022

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ПОВЫШЕНИЕ
БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ
НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

Журнал 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 не обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность
за содержание представленных в редакцию
материалов и публикацию их в открытой печати.
Мнение редакции не всегда совпадает
с мнением авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 27.06.2022.

Выход в свет 30.06.2022.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбл, 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)

Бурханов А.И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический универ-
ситет, Волгоград, 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

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

CONTENTS

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

N.L. POLETAEV Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа	5	N.L. POLETAEV Estimating the maximum size of explosive iron sulfide particles
V.A. GOREV, D.A. KOROLCHENKO Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении	12	V.A. GOREV, A.D. KOROLCHENKO The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion
БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ		SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS
E.V. GOLOVINA, A.V. KALACH, O.V. BEZZAPONNAYA, A.S. KRUTOLAPOV, S.V. SHARAPOV Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов	24	E.V. GOLOVINA, A.V. KALACH, O.V. BEZZAPONNAYA, A.S. KRUTOLAPOV, S.V. SHARAPOV Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ		MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES
N.V. BARANOVSKIY, V.A. VYATKINA Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи	34	N.V. BARANOVSKIY, V.A. VYATKINA Mathematical simulation of inert heating and pyrolysis of forest fuel under the influence of a forest fire front, if the process of sooting is taken into account
БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ		SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS
A.N. GARASHCHENKO, S.P. ANTONOV, A.I. DANILOV, V.V. PAVLOV, N.S. NOVIKOV Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности бетона и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций	45	A.N. GARASHCHENKO, S.P. ANTONOV, A.I. DANILOV, V.V. PAVLOV, N.S. NOVIKOV Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance
V.N. LOZHKIN Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов	65	V.N. LOZHKIN Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters
V.I. PRISADKOV, N.I. KONSTANTINOVA, S.V. MUSLAKOVA, A.A. ABASHKIN Классификация гостиниц с учетом пожарных рисков	75	V.I. PRISADKOV, N.I. KONSTANTINOVA, S.V. MUSLAKOVA, A.A. ABASHKIN Classification of hotels taking into account fire risks
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ		LIFE SAFETY
A.V. PEKHOTIKOV, R.A. IVASHCHUK, A.V. GOMOZOV, S.A. LUCHKIN Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре	84	A.V. PEKHOTIKOV, R.A. IVASHCHUK, A.V. GOMOZOV, S.A. LUCHKIN Analyzing the influence of the fire resistance of building structures on human safety in case of a fire
ВОПРОС – ОТВЕТ		QUESTION – ANSWER
A.S. KHARLAMENKOV Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России	96	A.S. KHARLAMENKOV The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia

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.



Оценка размера взрывоопасных частиц сульфида железа

▲ Стр. 5



◀ Стр. 45

Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой колонн и плит



Диагностика режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов

▲ Стр. 65



◀ Стр. 84

Анализ влияния огнестойкости на безопасность людей при пожаре

Стр. 96 ▶



Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ПОЖАРНАЯ • ПРОМЫШЛЕННАЯ • ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ • ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ

No. **3** VOL. 31
2022

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 27.06.2022.

Date of publication 30.06.2022.

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, Cand. 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)

A.I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgograd,
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)

Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа

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. Известны оценки максимального размера d_{cr} взрывоопасных частиц для двух видов сульфидной руды, выполненные на основе качественного подхода к анализу дисперсности горючих образцов руды (Soundararajan, Amyotte & Pegg, 1996): $49 \text{ мкм} < d_{cr, PO} < 63 \text{ мкм}$ для пирротина (PO); $85 \text{ мкм} < d_{cr, PY} < 145 \text{ мкм}$ для пирита (PY). Поставлена задача уточнить эти оценки, используя количественный метод упомянутого анализа и учитывая нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) по взвеси руды.

Метод обработки экспериментальных данных. Для двух полидисперсных образцов пирротина ($\text{НКПР}_{PO,1} = 475 \text{ г/м}^3$ и $\text{НКПР}_{PO,2} = 1375 \text{ г/м}^3$) и двух полидисперсных образцов пирита ($\text{НКПР}_{PY,1} = 375 \text{ г/м}^3$ и $\text{НКПР}_{PY,2} = 500 \text{ г/м}^3$) построены непрерывные функции F распределения частиц по размерам d . Полученные функции $F_{PO,1}(d)$, $F_{PO,2}(d)$, $F_{PY,1}(d)$ и $F_{PY,2}(d)$ представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

Оценка d_{cr} . Следуя процедуре оценки d_{cr} (Полетаев, 2014), находили значения $d_{cr, PO}$ и $d_{cr, PY}$ из уравнений $F_{PO,1}(d_{cr, PO})/F_{PO,2}(d_{cr, PO}) = \text{НКПР}_{PO,2}/\text{НКПР}_{PO,1}$ и $F_{PY,1}(d_{cr, PY})/F_{PY,2}(d_{cr, PY}) = \text{НКПР}_{PY,2}/\text{НКПР}_{PY,1}$, решение которых представлялось в наглядной графической форме.

Обсуждение результатов. Из-за низких значений показателей взрыва пирротина и пирита в 20-литровой камере (максимальное давление взрыва $P_{max} \leq 350 \text{ кПа}$, индекс $K_{st} \leq 2 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$) обсуждалась правомерность отнесения руд к взрывоопасным пылям. Низкие показатели взрыва подтверждают, что основным горючим в аэровзвеси выступает сера. Эмпирическое обоснование взрывоопасности руд (Selle & Zehr, 1954) получено путем оценки температуры горения, которая превышает $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы. Уточнены значения d_{cr} сульфидных руд: для пирротина $d_{cr} = 40 \text{ мкм}$, для пирита $d_{cr} = 107 \text{ мкм}$. В аэровзвесах руд выгорает, в основном, только сера, что заметно ослабляет взрывоопасность руд.

Ключевые слова: пирит; пирротин; взрыв пыли; 20-литровая камера; низкая взрывоопасность

Для цитирования: Полетаев 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

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

Estimating the maximum size of explosive iron sulfide particles

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. There are estimates of the maximum size d_{cr} of explosive particles of the two types of sulfide ores. The estimates are based on a qualitative approach to the dispersion analysis of combustible ore specimens (Soundararajan, Amyotte & Pegg, 1996): $49 \text{ }\mu\text{m} < d_{cr, PO} < 63 \text{ }\mu\text{m}$ for pyrrhotite (PO) and $85 \text{ }\mu\text{m} < d_{cr, PY} < 145 \text{ }\mu\text{m}$ for pyrite (PY). The task was to refine these estimates using the quantitative method of the mentioned analysis, taking into account the lower explosive limit (LEL) of flame propagation in terms of ore suspensions.

Experimental data processing method. Continuous functions F of particle size distribution d were constructed for the two polydisperse specimens of pyrrhotite ($\text{LEL}_{PO,1} = 475 \text{ g/m}^3$ and $\text{LEL}_{PO,2} = 1,375 \text{ g/m}^3$) and two polydisperse specimens of pyrite ($\text{LEL}_{PY,1} = 375 \text{ g/m}^3$ and $\text{LEL}_{PY,2} = 500 \text{ g/m}^3$). The obtained functions $F_{PO,1}(d)$, $F_{PO,2}(d)$, $F_{PY,1}(d)$ and $F_{PY,2}(d)$ were converted using Rosin – Rammler distributions, filling the gaps between the discrete data of the grain-size analysis of the specimens.

d_{cr} rating. The procedure for estimating d_{cr} (Poletaev, 2014) was employed to find the values of $d_{cr, PO}$ and $d_{cr, PY}$ using the following equations: $F_{PO,1}(d_{cr, PO})/F_{PO,2}(d_{cr, PO}) = LEL_{PO,2}/LEL_{PO,1}$ and $F_{PY,1}(d_{cr, PY})/F_{PY,2}(d_{cr, PY}) = LEL_{PY,2}/LEL_{PY,1}$. The solutions were presented in the visual graphic format.

Discussion of the results. Due to the low values of explosion parameters of pyrrhotite and pyrite in a 20-liter chamber (maximum explosion pressure $P_{max} \leq 350$ kPa, index $K_{st} \leq 2$ MPa·m/s), the validity of classifying ores as explosive dusts was discussed. Low explosion values have proven that sulfur is the main fuel in the air suspension. The explosiveness of ores is proven empirically (Selle & Zehr, 1954) by estimating the combustion temperature, which exceeds 1,000 °C.

Conclusions. The values of d_{cr} for sulfide ores have been refined: for pyrrhotite, $d_{cr} = 40$ μm; for pyrite $d_{cr} = 107$ μm. In the air suspensions of ores, only sulfur is burnt out, which substantially reduces the explosiveness of ores.

Keywords: pyrite; pyrrhotite; dust explosion; 20-liter chamber; low explosiveness

For citation: 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).

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

Введение

Промышленная добыча железной руды, представляющей сульфиды железа, сопряжена с опасностью взрывов мелкодисперсной пыли, которые регулярно возникают на рудниках различных стран (Австралии, Канады, Китая, США и других), принося как материальные убытки, так и потери среди работников данной отрасли [1–3]. Исследованию взрывоопасности сульфидов железа посвящено немало научных работ¹ [2, 4–7], однако, ряд опасных характеристик данных соединений, важных для профилактики аварий, остается недостаточно изученным. В частности, это касается предельного размера частиц, способных сформировать взрывоопасную взвесь. Например, в Австралии размеры таких частиц ограничены величиной 150 мкм, в то время как по российским нормам допускаются частицы размером до 300 мкм [6]. Опыт показывает, что нормативные ограничения могут иметь значительный запас надежности [8] из-за влияния различных факторов, к числу важнейших из которых относится содержание серы в руде. Поэтому в решении задачи о предельном размере взрывоопасных частиц, которому посвящена данная работа, следует оговаривать химический состав дисперсного материала.

В настоящей работе будут уточняться результаты, полученные в работе [1], где выполнены качественные оценки максимального среднего размера d_{max} взрывоопасных фракций двух видов сульфидной руды — пирротина и пирита. Для обозначения параметров этих веществ в дальнейшем используются индексы «РО» и «PY» соответственно. Согласно [1]: $49 \text{ мкм} < d_{max, PO} < 63 \text{ мкм}$ и $85 \text{ мкм} < d_{max, PY} < 145 \text{ мкм}$. Содержание железа и серы в пирротине составляло 38,6 и 34,2 % масс., в пирите соответственно 32,7 и 46,4 % масс. Из-за отсутствия (благодаря словам

«среднего размера») математической строгости определения параметра d_{max} , в настоящей работе уточняется смысл искомого параметра и решается задача определения значения обновленного параметра для рассмотренных в [1] образцов руды.

Следуя терминологии ГОСТ Р 12.3.047–2012 «ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» будем использовать параметр «максимальный размер d_{cr} взрывоопасных частиц взвеси» и оценим d_{cr} для упомянутых выше двух видов сульфидной руды. Оценка d_{cr} будет основана на разработанном ранее методе расчета [8], использующем значения нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) для нескольких полидисперсных образцов пыли одного вида.

Метод обработки экспериментальных данных

Использование методики [8] предполагает наличие, по крайней мере, двух полидисперсных образцов исследуемой пыли с известными значениями нижнего концентрационного предела распространения пламени НКПР и известным непрерывным распределением частиц по размерам $F(d)$. Под $F(d)$ понимается массовая доля частиц, имеющих размер менее d .

Согласно [1] для двух полидисперсных образцов пирротина, имеющих НКПР_{PO,1} = 475 г/м³ и НКПР_{PO,2} = 1375 г/м³, и двух полидисперсных образцов пирита, имеющих НКПР_{PY,1} = 375 г/м³ и НКПР_{PY,2} = 500 г/м³, известны данные дискретного ситового анализа, представленные в табл. 1.

Непрерывные функции распределения частиц данных 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 [9]:

$$F(d_s) = 1 - [1 - F(d_{s1})]^B,$$

¹ USBM, RI 9632. Report of investigations secondary explosion hazards during blasting in oil shale and sulfide ore mines. 1995.

Таблица 1. Данные, % масс., ситового анализа образцов пирротина и пирита [1]
Table 1. Data, in wt %, of the grain-size analysis of pyrrhotite and pyrite specimens [1]

Материал Material	< 200 мкм < 200 μm	< 125 мкм < 125 μm	< 75 мкм < 75 μm	< 45 мкм < 45 μm	< 20 мкм < 20 μm
Пирротин (1) Pyrrhotite (1)	100	100	90	39	14
Пирротин (2) Pyrrhotite (2)	100	100	100	99,58*	66
Пирит (1) Pyrite (1)	99	92	29	3	2
Пирит (2) Pyrite (2)	100	100	85	27	6

*Уточнение параметра с учетом сведений о среднем размере частиц (50 мкм).

*Parameter value refinement with account taken of the information on the average particle size (50 μm).

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

$$B = (d_s/d_{s1})^{G_k};$$

G_k — крутизна функции распределения;

$$G_k = Ln \frac{\left\{ \frac{Ln[1 - F(d_{s2})]}{Ln[1 - F(d_1)]} \right\}}{Ln(d_2 / d_1)};$$

индекс k принимает значение от 1 до 4, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси d в следующем перечне отрезков: от 20 до 45 мкм, от 45 до 75 мкм, от 75 до 125 мкм, от 125 до 200 мкм.

В табл. 2 приводятся значения параметра G_k .

Полученные кусочно гладкие и непрерывные функции распределения $F_{PO,1}(d), F_{PO,2}(d), F_{PY,1}(d)$ и $F_{PY,2}(d)$ представлены на рисунке.

Оценка d_{cr}

Согласно методике [8], оценка параметра d_{cr} использует следующие три предположения о закономерностях горения пыли заданного химического

Таблица 2. Крутизна функции распределения
Table 2. The steepness of the distribution function

Материал Material	G_k			
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
Пирротин (1) Pyrrhotite (1)	1,464	3,01		
Пирротин (2) Pyrrhotite (2)	2,0			
Пирит (1) Pyrite (1)	0,506	4,74	3,91	1,28
Пирит (2) Pyrite (2)	2,0	3,517		

состава. НКПР полидисперсной пыли обратно пропорционален полноте выгорания пыли вблизи НКПР [10]. Зависимость полноты выгорания Z монодисперсной фракции пыли от размера частиц d вблизи НКПР близка к одноступенчатой функции (см., например, [11]) и может быть представлена в виде: $Z = 1$, если $d \leq d_{cr}$, и $Z = 0$, если $d > d_{cr}$. Для оценки НКПР полидисперсной пыли, рассматриваемой в виде смеси пылей, представляющих монодисперсные фракции, можно использовать правило Ле Шателье [11].

В рамках используемых предположений $d_{cr, PO}$ и $d_{cr, PY}$ для пирротина и пирита соответственно находят из геометрически наглядного решения уравнений

$$F_{PY,1}(d_{cr, PY})/F_{PY,2}(d_{cr, PY}) = \text{НКПР}_{PY,2}/\text{НКПР}_{PY,1},$$

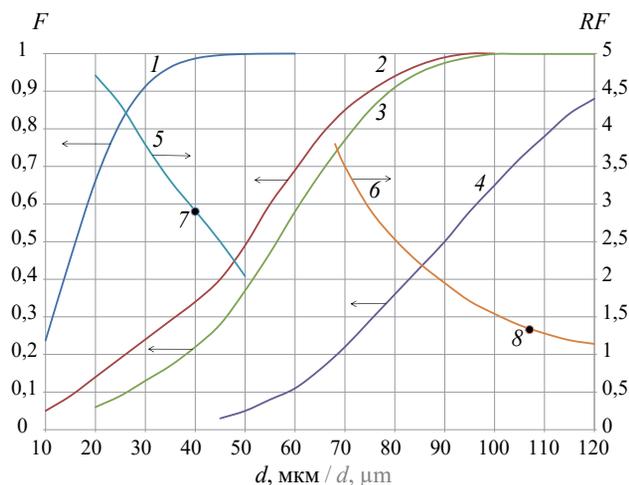
$$F_{PO,2}(d_{cr, PO})/F_{PO,1}(d_{cr, PO}) = \text{НКПР}_{PO,2}/\text{НКПР}_{PO,1}.$$

Согласно представленной на рисунке графической информации, имеем для пирротина $d_{cr, PO} = 40$ мкм, для пирита $d_{cr, PY} = 107$ мкм.

Обсуждение результатов

Расчет $d_{cr, PY}$ для пирита не противоречит результатам качественных оценок [1], но уточняет положение границы взрывоопасной фракции пирита. Расчетная величина $d_{cr, PO}$ для пирротина заметно ниже качественного прогноза [1], что указывает на возможность сокращения масштаба взрывоопасной фракции пирротина и подтверждает полезность количественного подхода к оценке d_{cr} , заимствованного из [8].

В то же время следует отметить, что объективность результатов настоящей работы зависит от надежности использованных исходных данных о сульфидах железа, которая, как будет видно из нижеизложенного, нуждается в дополнительном анализе. Действительно, расчет по [8] предполагает использование показателей взрывоопасности пылевоздушных смесей, исследованных в крупно-



Функции распределения $F_{PY,1}$ (1), $F_{PY,2}$ (2), $F_{PO,1}$ (3), $F_{PO,2}$ (4) частиц сульфидов железа по размерам d и их отношения $RF_{PY} = F_{PY,1}/F_{PY,2}$ (5) и $RF_{PO} = F_{PO,1}/F_{PO,2}$ (6). Жирными точками 7 и 8 отмечены случаи $RF_{PY} = НКПР_{PY,2}/НКПР_{PY,1} = 2,9$ и $RF_{PO} = НКПР_{PO,2}/НКПР_{PO,1} = 1,33$ соответственно

Distribution functions $F_{PY,1}$ (1), $F_{PY,2}$ (2), $F_{PO,1}$ (3), $F_{PO,2}$ (4) of iron sulfide particles by size d and their ratios $RF_{PY} = F_{PY,1}/F_{PY,2}$ (5) and $RF_{PO} = F_{PO,1}/F_{PO,2}$ (6). Bullet points 7 and 8 mark the cases $RF_{PY} = НКПР_{PY,2}/НКПР_{PY,1} = 2.9$ and $RF_{PO} = НКПР_{PO,2}/НКПР_{PO,1} = 1.33$, respectively

масштабной взрывной камере объемом порядка 1 м³ с энергоемким источником зажигания (10 кДж). Использование такой камеры позволяет не сомневаться в наличии или в отсутствии взрывоопасности исследуемой пыли, особенно в тех случаях, когда пыль близка к границе между взрывоопасными и взрывобезопасными дисперсными материалами [12]. Поскольку автору не удалось обнаружить информацию о стандартных исследованиях показателей взрывоопасности рассматриваемых пылей в крупномасштабной камере, включая поиск в международном банке данных², в настоящей работе использованы результаты исследований в камере объемом 20 л с учетом описанных ниже предосторожностей.

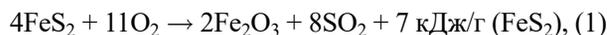
Согласно классификации [12], аэровзвеси сульфидов железа демонстрируют принадлежность к аэровзвесям с низкой взрывоопасностью, которым в последнее время стали уделять повышенное внимание [13–17]. Как показано в [12], наиболее распространенная в мировой практике 20-литровая камера Р. Сивека способствует завышению оценки взрывоопасности пыли, допуская для упомянутых пылей случаи отнесения невзрывоопасной пыли к числу взрывоопасных пылей.

Правила «недоверия» результатам исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере перечислены в [12]. Согласно одному из таких

правил, пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м³ будет, вероятнее всего, отнесена к невзрывоопасным, если в 20-литровой камере Р. Сивека при использовании источника зажигания с энергией 10 кДж для этой пыли получено $K_{st} < 4,5$ МПа·м/с. Здесь $K_{st} = V^{1/3}(dP/dt)_{max}$ — нормированное на объем взрывной камеры V значение максимальной скорости нарастания давления взрыва $(dP/dt)_{max}$.

Для использованных в настоящей работе образцов пирита и пирротина получены в 20-литровой камере значения $K_{st} \leq 2,0$ МПа·м/с [1]. Хотя при исследовании образцов пирита и пирротина в [1] применяли менее энергоемкий источник зажигания (5 кДж), из-за наличия сформулированного выше правила «недоверия» возникают сомнения во взрывоопасности упомянутых образцов. Для устранения сомнений ниже приводится описание механизма горения аэровзвеси сульфидов железа, производится оценка минимально возможных значений параметров взрыва и сравнение этих параметров с параметрами горения сульфидов железа, использованных в данной работе.

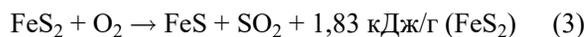
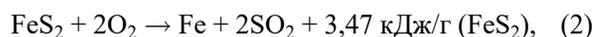
Специфика горения аэровзвесей сульфидов железа в замкнутом объеме состоит как в низком значении скорости нарастания давления продуктов горения, о чем говорилось выше, так и в низком значении максимального давления продуктов горения (≈ 360 кПа¹ [1, 2, 4]). Последнее указывает на неравноправное участие железа и серы, входящих в состав пирита, в реакции окисления кислородом воздуха. Действительно, при равноправном участии, описываемом реакцией:



и стехиометрическом содержании пирита в аэровзвеси максимальное давление продуктов горения P_{max} составит величину около 720 кПа, которая в два раза превышает экспериментальное значение параметра. Здесь и далее используются термодинамические характеристики участвующих в реакциях веществ, приведенные в [18].

Альтернативой реакции (1) является предположение о том, что основным горючим в аэровзвеси сульфидов железа выступает сера [1].

Термодинамическим расчетом несложно показать, что для двух вариантов реакции серы, входящей в состав пирита, с кислородом воздуха

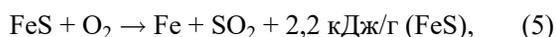


оценки P_{max} и максимальной адиабатической температуры горения T_b дают значения порядка 350...400 кПа (которые отвечают как результатам тестирования пирита в 20-литровой камере, так

² GESIS-DUST-EX: compiled by IFA (Institut fuer Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung), as of 2021. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>

и результатам нестандартных исследований пирита в крупномасштабной камере¹⁾ и 1000...1200 °С соответственно.

Выполнить подобные расчеты и получить аналогичные выводы можно и для случая окисления пирротина кислородом воздуха



где реакция (4) отвечает равноправному выгоранию железа и серы (расчет: $P_{\max} = 700$ кПа), а в реакции (5) горючим является только сера (расчет: $P_{\max} = 330$ кПа, $T_b = 1000$ °С).

Общность полученных оценок поддерживает уверенность в объективности описания механизма проявления взрывоопасности сульфидов железа через реакции (2), (3) и (5). Расчетная величина $T_b \geq 1000$ °С отвечает эмпирическому определению взрывоопасной аэровзвеси [19], устраняя высказанные в начале данного раздела сомнения по вопросу о взрывоопасности данных веществ.

Выводы

Рассмотрены известные качественные оценки максимального среднего размера частиц взрыво-

опасных аэровзвесей пирротина (от 49 до 63 мкм) и пирита (от 85 до 145 мкм), полученные на основе результатов тестирования взрывоопасности упомянутых материалов в сферической камере объемом 20 л.

Данные оценки уточнены на основе количественного метода, в котором используются сведения о нижнем концентрационном пределе распространения пламени для нескольких (двух и более) полидисперсных образцов каждого из анализируемых материалов. Уточненные значения критического параметра составили 40 мкм для пирротина и 107 мкм для пирита.

Из-за низких значений показателей взрыва пирротина и пирита в камере объемом 20 л (максимальное давление взрыва $P_{\max} \leq 350$ кПа, индекс $K_{st} \leq 2$ МПа·м/с) обсуждалась правомерность отнесения анализируемых материалов к взрывоопасным пылям. Низкие значения показателей взрыва обусловлены механизмом горения аэровзвеси сульфидов железа, при котором в качестве основного горючего выступает сера. Одновременно показано, что расчетная величина максимальной адиабатической температуры горения рассматриваемых аэровзвесей $T_b \geq 1000$ °С, что отвечает эмпирическому определению взрывоопасной пыли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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
2. *Rao Yun-zhang, Tian Chang-shun, Xu Wei, Xiao Chun-yu, Yuan Bo-yun, Yu Yao.* Explosion pressure and minimum explosible concentration properties of metal sulfide ore dust clouds // *Journal of Chemistry*. 2020. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/7980403
3. *Тетерев Н.А., Ермолаев А.И., Кузнецов А.М.* Взрывы сульфидной пыли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. Спец. вып. 63. № 12. 20 с.
4. *Liu Q., Katsabanis P.D.* Hazard evaluation of sulphide dust explosions // *Journal of Hazardous Materials*. 1993. Vol. 33. Issue 1. Pp. 35–49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-j
5. *Ермолаев А.И., Тетерев Н.А.* Анализ исследований в области взрывов пыли и их предупреждения на подземных рудниках // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015. № 8. С. 75–80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24993420>
6. *Rylnikova M., Fedotenko V., Mitishova N.* Influence of structural and textural features of ores and rocks on mine dust explosion hazard during development of pyrite deposits // *E3S Web of Conferen-*
7. *Горин С.А., Маслов И.Ю.* Возгорание пылевоздушных смесей под действием ударных воздушных волн при подземной добыче колчеданных руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 33. С. 13–22. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-33-13-22
8. *Полетаев 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
9. *Коузов П.А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л.: Химия, 1987. 264 с.
10. *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. Bd. 38. S. 583.
11. *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.
12. *Полетаев Н.Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей

- пыли в 20-литровой камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
13. Поletaев Н.Л. О взрывоопасности взрывов меламина // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.1528
 14. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. Iron and aluminum powder explosibility in 20-l and 1 m³ chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
 15. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-l and 1 m³ test chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
 16. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and protection // Chemical Engineering Transactions. 2019. Vol. 77. Pp. 7–12. DOI: 10.3303/CET1977002
 17. Поletaев Н.Л. Об оценке 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
 18. Термические константы веществ / под ред. В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1965–1981. Вып. I–X.
 19. 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. Bd. 38. S. 583.

REFERENCES

1. 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
2. Rao Yun-zhang, Tian Chang-shun, Xu Wei, Xiao Chun-yu, Yuan Bo-yun, Yu Yao. Explosion pressure and minimum explosible concentration properties of metal sulfide ore dust clouds. *Journal of Chemistry*. 2020; 1-12. DOI: 10.1155/2020/7980403
3. Teterev N.A., Ermolaev A.I., Kuznetsov A.M. Explosions of sulfide dust. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'/Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; Special edition 63:1-29. (rus).
4. Liu Q., Katsabanis P.D. Hazard evaluation of sulphide dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1993; 33(1):35-49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-j
5. Ermolaev A.I., Teterev N.A. Analysis of investigations in the sphere of dust explosions and its prevention at underground mines. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal/Minerals and Mining Engineering*. 2015; 8:75-80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24993420> (rus).
6. Rylnikova M., Fedotenko V., Mitishova N. Influence of structural and textural features of ores and rocks on mine dust explosion hazard during development of pyrite deposits. *E3S Web of Conferences*. 2020; 192:03017. DOI: 10.1051/e3sconf/202019203017
7. Gorinov S.A., Maslov I.Yu. Ignition of dust-air mixtures under the action of air shock waves in underground mining of massive sulfide ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'/Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; Special edition 33:13-22. (rus).
8. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive mono-disperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26 (rus).
9. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264.
10. 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).
11. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. *The Industrial Dust Explosions*. K.L. Cashdollar, M. Henzberg (ed.). ASTM Special Technical Publication 958. Philadelphia, ASTM, 1987; 5-32.
12. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
13. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26 (9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
14. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. Iron and aluminum powder explosibility in 20-l and 1 m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
15. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-l and 1 m³ test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
16. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and

- protection. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 77:7-12. DOI: 10.3303/CET1977002
17. Poletaev N.L. On the assessment of the explosion hazard of nuclear graphite in a 1-m³ chamber. *Pozharo-vzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.18322/PVB.2022.31.02.15-21
18. *Thermal constants of substances*. V.P. Glushko (ed.). Moscow, VINITI, 1965-1981; I–X.
19. 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).

*Поступила 12.04.2022, после доработки 5.05.2022;
принята к публикации 20.05.2022*

*Received April 12, 2022; Received in revised form May 5, 2022;
Accepted May 20, 2022*

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

Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении

Вячеслав Александрович Горев, Антон Дмитриевич Корольченко ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе рассматривается аварийный взрыв газа в помещении при условии сброса давления через проемы, в которых были установлены легкобрасываемые конструкции.

Решение данной проблемы актуально для защиты от последствий взрыва в жилых зданиях. Это связано с тем, что объемы помещений в жилых зданиях невелики по сравнению с промышленными зданиями, что определяет более жесткие условия сброса давления в начальный момент развития взрыва. В работе показано, что в малом объеме за время движения легкобрасываемой конструкции в проеме до момента начала сброса давления оно может достигнуть критических значений.

Цели. В работе ставится цель определить формирование взрывных нагрузок начиная с момента взрыва до формирования максимального значения давления с учетом свойств легкобрасываемых конструкций и закономерности их вскрытия. Такая цель обусловлена тем, что до настоящего времени формирование давления на этой стадии рассматривалось без учета места установки легкобрасываемых конструкций по глубине стенового проема. Основное внимание при этом уделялось подбору площади проема.

Методы. С использованием метода теории размерностей, численного и аналитического моделирования процессов взрыва, истечения газов и движения твердого тела получены безразмерные комплексы, которые описывают формирование взрывной нагрузки до момента достижения ее максимального значения. Эти комплексы позволяют определить взрывные нагрузки для помещений разного объема, что также является новым результатом.

Результаты. В настоящей работе выявлено влияние на конечный результат отдельных факторов, таких как: объем помещения; давление, при котором легкобрасываемая конструкция начинает движение; масса и глубина установки легкобрасываемой конструкции в проеме; периметр проема и скорость взрывного горения.

Выводы. Результаты, полученные в процессе работы, позволяют определять динамическую нагрузку взрыва на стадии ее роста. Знание этой величины дает возможность более надежно устанавливать несущие характеристики конструкций при аварийных взрывах в жилых помещениях.

Ключевые слова: взрыв газа; горючий газ; взрывные нагрузки; взрывопожароопасность помещений; сброс давления; заглубление предохранительной конструкции

Для цитирования: Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 12–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23

✉ Корольченко Антон Дмитриевич, e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion

Vyacheslav A. Gorev, Anton D. Korolchenko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The article considers an accidental indoor gas explosion on condition of pressure relief through openings in which venting structures were installed.

A solution to this problem can protect residential buildings from consequences of explosions due to the fact that the volume of premises in residential buildings is small compared to industrial buildings, and it determines more stringent pressure relief conditions at the initial moment of the explosion development. The article shows that pressure can reach critical values in a small space during the motion of a venting structure in the opening before the onset of pressure relief.

Goals. The authors aim to identify the pattern of blast load development from the moment of explosion to the attainment of the maximum pressure value with account taken of the properties of venting structures and patterns of their opening. This goal is relevant due to the fact that until now at this stage pressure development has been considered without any account taken of how deeply the venting structure is installed in the wall opening. Much attention was focused on the selection of the opening size.

Methods. The methods of the theory of dimensions, numerical and analytical modeling of explosion processes, patterns of gas escape and rigid body motion were applied to obtain dimensionless groups describing the development of an explosive load until maximum values. These dimensionless groups allow identifying explosive loads for rooms having different volumes, which is also a new result.

Results. In this work, the influence of individual factors on the ultimate result has been identified. These factors are the room volume, the pressure at which the venting structure starts moving, the mass and position of the venting structure in the opening, the opening perimeter and the rate of explosive combustion.

Conclusions. The results, obtained in the course of this work, allow identifying the dynamic load of an explosion at the stage of its growth. This value can be used to set more reliable bearing characteristics of structures for cases of accidental explosions in living accommodations.

Keywords: gas explosion; combustible gas; explosive load; explosion and fire hazards on premises; pressure relief; embedment of a safety structure

For citation: Gorev V.A., Korolchenko A.D. The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):12-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23 (rus).

✉ Anton Dmitrievich Korolchenko, e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

Введение

Аварийные взрывы газо- и пылевоздушных смесей в помещениях приводят к значительному материальному ущербу и человеческим жертвам. В последнее время в нашей стране участились взрывы смесей природного газа в жилом секторе. Характер разрушений в результате взрыва свидетельствует о том, что меры по снижению взрывных нагрузок оказываются неэффективными. В первую очередь это относится к мероприятиям, направленным на снижение давления взрыва путем сброса давления через открывающиеся проемы, которые до взрыва были закрыты легкосбрасываемыми конструкциями (ЛСК). На начальной стадии взрыва при низком давлении связи, удерживающие эти конструкции в системе ограждающих конструкций, разрушаются, что приводит ЛСК в движение. В результате происходит открытие пространства для сброса давления.

Для обеспечения защиты здания от разрушения необходимо, чтобы площадь проемов, перекрытых ЛСК, была достаточной и их открытие было быстрым.

Первое требование означает, что через полностью открытые проемы сброс давления должен происходить быстрее, чем его нарастание при максимальной скорости выделения энергии. При этом давление в объеме не должно превышать допустимое. Второе требование относится к легкосбрасываемым конструкциям и их закреплению. Оно сводится к возможности обеспечивать сброс давления до требуемого уровня при неполноте открытого проема во время начала движения ЛСК.

В работах [1, 2], по-видимому, впервые был выполнен анализ проблемы внутренних взрывов с помощью теории подобия и получены определя-

ющие соотношения в безразмерных комплексах. При этом безразмерные комплексы были одинаковыми для изначально разгерметизированных объемов и для объемов, которые разгерметизировались во время взрыва. Главный результат работ [1, 2] сводится к определению граничных значений безразмерных комплексов, внутри которых находятся все известные к моменту публикации этих работ результаты. Позднее были получены данные [3–8], которые не подтверждали выводы, сделанные авторами работ [1, 2]. Эти расхождения можно объяснить высокой скоростью турбулентного горения [3, 4] или невыполнением условий квазистационарности взрывов в тех случаях [5–8], когда прослеживаются волновые эффекты. В работах [1, 2] характер взрыва предполагался квазистационарным, а безразмерная скорость горения основана на ламинарном горении, без учета сильной турбулентности.

При аварийных взрывах горение часто турбулизируется из-за присутствия преград. Это положение подтверждается экспериментально [9–11] и при численном моделировании взрыва в условиях загроможденного пространства [12–14].

Сравнение результатов, полученных для объемов, которые разгерметизировались в момент взрыва, не проводилось. Однако можно с уверенностью утверждать, что в этом случае отклонения от данных, представленных в [1, 2], могут быть значительными.

Безразмерные комплексы для таких случаев не учитывают ряд параметров, от которых с очевидностью зависит давление взрыва на начальной стадии его развития. К ним следует отнести: давление разрушения связей, удерживающих легкосбрасываемые конструкции; инерционность этих конструкций, от которой зависит скорость их дви-

жения; глубина установки конструкции в проеме, так как только после смещения ЛСК на эту величину начинается сброс давления. Кроме того, важное значение имеет периметр открытого проема, поскольку на начальной стадии его открытия сброс давления происходит через площадь, определяемую периметром проема и смещением конструкции после выхода из него.

В работах [15–17] изучено влияние инерционности конструкций на формирование взрывной нагрузки. Влияние момента начала вскрытия и глубины установки конструкции при этом оказалось вне поля зрения авторов.

В предлагаемой работе предпринята попытка предложить безразмерные комплексы, которые позволят описать формирование взрывной нагрузки на начальной стадии развития взрыва с учетом сброса давления.

В работе учитывается также влияние глубины установки легкобрасываемых конструкций в проеме на формирование взрывной нагрузки. Это особенно важно для помещений жилого комплекса объемом менее 120 м³.

Ранее в работах [18–20] было показано, что при взрыве в таких помещениях давление может достигать критических значений еще до выхода ЛСК из проема. В работе [21] был рассмотрен вопрос о движении поворотной легкобрасываемой конструкции, заглубленной в проеме. Экспериментальное масштабное моделирование было проведено в [22] при условии равенства давлений вскрытия для модели и натуре. Время достижения максимума давления после выхода конструкции из проема определено в [23], но при этом не было установлено его значение.

До настоящего времени площадь проемов, перекрытых ЛСК, назначалась в зависимости от объема помещения по правилам, разработанным для промышленных помещений большого объема. В таких помещениях максимальное давление взрыва формируется к моменту достижения максимальной мощности взрыва, когда проемы для сброса давления открыты полностью. Именно при этом давлении проверяются конструкции на несущую способность [1, 2, 24–27].

В помещениях малого объема, например в кухнях, где происходили взрывы с катастрофическими последствиями, площади проемов намного превышали площади, требуемые по правилам. В предлагаемой работе рассматривается полный цикл движения легкобрасываемой конструкции с учетом ее движения в проеме до формирования максимума давления. Определяется этот максимум давления, и показывается, что он может быть значительно больше того, который формируется

при максимальной мощности взрыва. Другими словами, в работе решается вопрос о нарастании взрывной нагрузки до максимального значения давления в начальный период развития взрыва с учетом закрепления и инерционности ЛСК, объема помещения, периметра проема и его площади. До формирования пика давления на этом этапе площадь истечения газов определяется периметром проема и скоростью ЛСК при выходе из него. Именно на этом участке определяются динамические характеристики нагрузки.

Методы исследования

При квазистационарном взрыве в замкнутом объеме давление непрерывно растет до достижения максимального значения в несколько сот кПа. Например, при взрыве стехиометрической смеси метана эта величина равна 960 кПа. Типичное значение допускаемого избыточного давления для обеспечения устойчивости промышленных и жилых зданий составляет около 5 кПа. Таким образом, с помощью легкобрасываемых конструкций необходимо снизить максимальное давление взрыва более чем в 100 раз. При этом конструкция должна начинать смещение при давлении 1–2 кПа, в зависимости от ветрового района. Открытие пространства для истечения должно происходить быстро, чтобы компенсировать рост давления за счет развития очага взрыва. Открытое полностью пространство для сброса давления должно обеспечивать условие $P_2 \leq P_{\text{доп}}$ (где P_2 — давление в объеме при максимальной скорости выделения энергии в процессе взрыва; $P_{\text{доп}}$ — допустимое давление взрыва, определяемое из условия предельного равновесия защищаемых конструкций).

При рассматриваемых давлениях возможны важные предположения:

- объемная скорость истечения описывается соотношением:

$$\Delta \dot{V} = K_{\text{ист}} S_0 \sqrt{2 \Delta P(t) / \rho_c}; \quad (1)$$

- давление в замкнутом объеме на начальной стадии развития взрыва определяется зависимостью:

$$\Delta P(t) = P_{\text{отк}} (t/t_{\text{отк}})^3, \quad (2)$$

где $K_{\text{ист}}$ — коэффициент истечения газа;
 S_0 — открытая площадь для истечения;
 ρ_c — плотность истекающих продуктов сгорания;
 $P_{\text{отк}}$ — давление в момент открытия проема;
 $t_{\text{отк}}$ — время открытия проема для начала сброса давления.

Максимальное давление в разгерметизированном объеме P_2 достигается при условии равенства

скорости образования нового объема в результате горения в момент максимальной скорости взрыва и объемной скорости истечения при сбросе давления:

$$(U_r \cdot A_f)_{\max} (\sigma - 1) = K_{\text{ист}} S_0 \sqrt{2P_2/\rho_c}, \quad (3)$$

где $(U_r \cdot A_f)$ — произведение скорости горения на площадь пламени, которое обычно достигает максимума при максимальном значении площади пламени в момент касания им ограждения;

$\sigma = \rho_0 / \rho_c$ — отношение плотности исходной горючей смеси ρ_0 к плотности продуктов сгорания, которое не изменяется в течение взрыва: на начальной стадии сброса давления истекает холодная исходная смесь, а в момент максимальной мощности взрыва истекают горячие продукты сгорания плотностью ρ_c .

Площадь пламени зависит от объема помещения V_0 и формы пламени, учитываемой коэффициентом K_f :

$$A_f = K_f V_0^{2/3}. \quad (4)$$

В результате из (3) и (4) следует:

$$S_0 = \frac{K_f V_0^{2/3} U_r (\sigma - 1) \rho_0^{1/2}}{2^{1/2} K_{\text{ист}} P_2^{1/2} \sigma^{1/2}}. \quad (5)$$

Выражение (5) можно использовать в безразмерном виде:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0 P_0^{1/2}}{V_0^{2/3} U_r \rho_0^{1/2}} = \frac{K_f}{K_{\text{ист}}} (\sigma - 1) \left(\frac{P_0}{2P_2 \sigma} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где P_0 — атмосферное давление, кПа.

Выражение (6) соответствует связи между безразмерными комплексами работ [1, 2] для случая взрыва в разгерметизированном объеме при условиях данной постановки задачи.

В работах [18–20] проанализировано влияние глубины установки ЛСК в проеме, инерционности конструкции, давления разрушения связей легкобрасываемой конструкции, площади и периметра

проема, скорости горения и объема помещения на формирование взрывной нагрузки в начальный момент взрыва. Движение ЛСК в проеме определяется параметром B :

$$B = \frac{P_{\text{вск}}^{5/3} V_0^{2/3} (K_2/\gamma)^{2/3}}{\rho_{\text{п}} X_0 U_{\text{г1}}^2 P_0^{2/3} ((\sigma - 1)\sigma^2)^{2/3}}, \quad (7)$$

где K_2 — коэффициент, учитывающий форму очага взрыва на начальной стадии; для сферического очага горения $K_2 = 3 / (4\pi)$;

γ — показатель адиабаты;

$\rho_{\text{п}}$ — масса единицы площади конструкции;

$\rho_{\text{п}} = m/S_0$

X_0 — глубина установки панели в проеме (рис. 1);

$U_{\text{г1}}$ — скорость взрывного горения в момент вскрытия проема.

После смещения легкобрасываемой конструкции на глубину установки X_0 начинается истечение газа из объема и сброс давления. До момента начала истечения давление в объеме определяется соотношением (2), а время начала истечения $t_{\text{отк}}$ устанавливается из выражения:

$$\frac{4}{B} = [K_1^5 / 5 - K_1 + 0,8], \quad (8)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий отношение времени начала сброса давления к времени начала движения конструкции при давлении $P_{\text{вск}}$, задаваемом при проектировании ЛСК;

$K_1 = t_{\text{отк}} / t_{\text{вск}}$;

$t_{\text{вск}}$ — время достижения давления $P_{\text{вск}}$.

Время достижения давления $P_{\text{вск}}$ определяется из (2):

$$t_{\text{вск}} = \left(\frac{K_2 P_{\text{вск}} V_0}{P_0 U_r^3 \gamma (\sigma - 1)\sigma^2} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

В табл. 1 дается представление о связи между параметром B и временем, которое ЛСК движется в проеме, и давлением в помещении в эти моменты времени.

Таблица 1. Связь между параметром B и движением легкобрасываемой конструкции в проеме

Table 1. Relationship between parameter B and the motion of a venting structure in the opening

Показатель Indicator	Параметр B Parameter B									
	0,5	1	2	4	8	10	16	22,8	33,18	50
K_1	2,16	1,91	1,71	1,54	1,41	1,37	1,306	1,26	1,22	1,18
$P_{\text{отк}}/P_{\text{вск}}$ $P_{\text{оп}}/P_0$	10,08	7	5	3,65	2,8	2,6	2,23	2,00	1,816	1,643

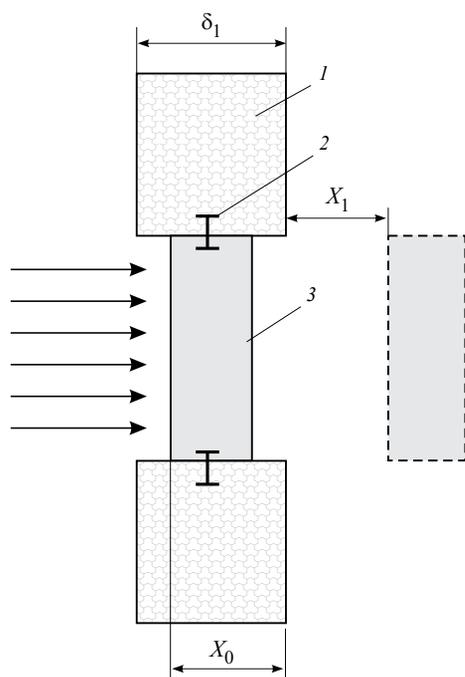


Рис. 1. Расположение легкобрасываемой конструкции в проеме: 1 — ограждающая конструкция (стена здания); 2 — крепление ЛСК; 3 — легкобрасываемая конструкция; X_0 — глубина установки; $X_1 = S_0/\Pi$ (Π — периметр проема)

Fig. 1. Location of the venting structure in the opening: 1 is the enclosing structure (the building wall); 2 is the venting structure fastener; 3 is the venting structure; X_0 is the installation depth; $X_1 = S_0/P$ (P — perimeter of the opening)

Если требуемую площадь открытых проемов определять исходя из условий при максимальной мощности взрыва (5) и (6), то необходимо задать давление P_2 (допускаемое). Это давление определяется из условий предельного равновесия защищаемых конструкций при их статическом нагружении. Для изгибаемых балочных конструкций это условие сводится к отношению:

$$M_{изг}/Z_p \leq \sigma_T, \tag{10}$$

где $M_{изг}$, Z_p — внешний изгибающий момент в сечении с пластическим моментом сопротивления изгибу;

σ_T — предел текучести изгибаемого материала.

После определения допускаемого давления, например, как это делается в [21, 22], изгибающий момент описывается уравнением:

$$M_{изг} = \alpha P_2 b L^2, \tag{11}$$

где α — коэффициент, учитывающий характер закрепления изгибаемой конструкции;

b — ширина полосы сбора нагрузки;

L — расчетная длина изгибаемой конструкции.

В дальнейшем, определив безразмерную площадь \bar{S}_0 по (6), следует перейти к анализу действия легкобрасываемой конструкции после начала сброса давления, т.е. после $t_{отк}$.

С момента начала сброса давления динамика его изменения в объеме будет по-прежнему определяться комплексом B и еще двумя новыми комплексами:

$$\bar{S}_1 = \frac{S_0 (P_0/P_{вск})^{1/6} (P_0/\rho_0)^{1/2}}{U_r [(\sigma-1)\sigma^2]^{1/3} V_0^{2/3}}, \tag{12}$$

$$B_1 = \frac{(K_2/\gamma)^{2/3} P_{вск}^{5/3} V_0^{2/3} \Pi}{((\sigma-1)\sigma^2)^{2/3} P_0^{2/3} S_0 \rho_n U_r^2}. \tag{13}$$

Нетрудно заметить, что параметры \bar{S}_1 и \bar{S}_0 можно связать между собой, а комплекс B_1 получается из комплекса B заменой глубины установки легкобрасываемой конструкции X_0 на отношение S_0/Π . В комплексе B_1 появляется новый параметр — периметр проема Π . Это значит, что скорость сброса давления на участке, где проем открыт не полностью, определяется периметром проема, а не его площадью. Этот участок заканчивается, когда смещение ЛСК от места выхода из проема достигнет величины:

$$X_1 = S_0 / \Pi.$$

Комплекс \bar{S}_1 связан с комплексом B_1 соотношением

$$B_1 = (K_2/\gamma)^{2/3} (\bar{W}^3 \bar{S})^{-1}, \tag{14}$$

где

$$\bar{W}^3 = \frac{U_r^3 (\sigma-1)\sigma^2 \rho_n \rho_0^{1/2}}{\Pi P_{вск}^{3/2}}.$$

Таким образом, разработан аппарат для анализа изменения давления внутреннего взрыва с учетом влияния движения ЛСК и начала сброса давления. Основное внимание уделено начальной стадии развития взрыва, когда проем для сброса давления открыт еще не полностью. Это особенно важно при взрывах в помещениях небольшого объема и в случае заглубления легкобрасываемых конструкций внутри проема. Легкобрасываемая конструкция считается заглубленной на глубину X_0 , если для освобождения пространства для начала истечения газов ЛСК необходимо переместиться на расстояние X_0 . В настоящей работе представлены новые безразмерные параметры \bar{S}_1 (12) и B_1 (13), которые, наряду с параметром B , определяют дина-

мику давления взрыва в период от начала сброса давления до полного открытия проема при смещении после выхода из него ЛСК на расстояние X_1 .

В этом состоит основное отличие настоящей работы от [15–17], где не учитывалась глубина установки ЛСК, и от работ [18–24], в которых изучалась динамика давления при движении ЛСК только в зоне заглупления.

Результаты исследования и их обсуждение

Из табл. 1 следует, что при $B \leq 10$ давление в объеме может достигать опасных значений еще до начала его сброса. В этом случае необходимо тщательно подбирать давление вскрытия $P_{вск}$ (по возможности, с учетом ветровых нагрузок), сводя его к минимуму. Уменьшение глубины установки и массы легкобрасываемой конструкции также улучшает ситуацию. Для помещений больших объемов параметры B и B_1 больше, а это означает, что на стадии открытия проемов взрыв в больших помещениях протекает с меньшей угрозой достижения критических значений давления. Кроме того, при квазистатическом взрыве в больших объемах характер нагрузки менее динамичный. Условие, при котором давление $P_{отк}$ на момент начала его сброса будет больше P_2 , имеет вид:

$$K_1 > (P_2/P_{вск})^{1/3}. \tag{15}$$

Анализ решений модельных уравнений показывает, что максимальное давление и время его достижения на стадии взрыва до полного открытия проема определяются комплексами B , B_1 и \bar{S}_1 . В случае, когда ЛСК не заглуплена, т.е. $X_0 = 0$ и $B \rightarrow \infty$, а $K = 1$, давление определяется комплексами B_1 и \bar{S}_1 или \bar{W}^3 .

Для анализа зависимости параметров первого пика от комплексов B , B_1 и \bar{S}_1 рассматриваются определенные значения \bar{S}_1 , которые соответствуют значениям \bar{S}_0 , вычисляемым по (6) при различных значениях \bar{P}_2 . В табл. 2 дается представление о связи величин P_2 , \bar{S}_0 , и \bar{S}_1 .

Данные табл. 2 получены при $\sigma = 7,5$, $\rho_0 = 1,21 \text{ кг/м}^3$, $P_{вск} = 1,5 \text{ кПа}$, $P_0 = 100 \text{ кПа}$. На рис. 2 представлены результаты расчетов давления на пер-

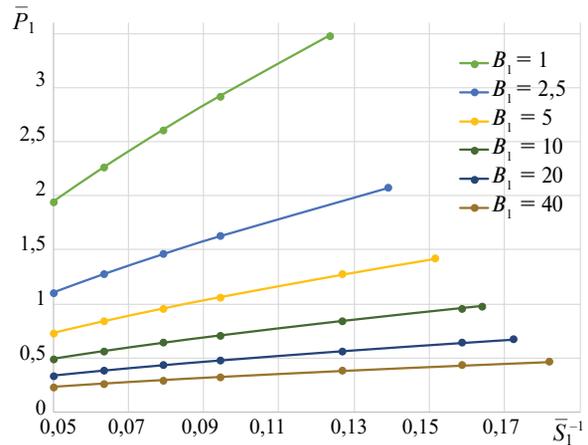


Рис. 2. Максимальное давление во время вскрытия проема, когда ЛСК не заглуплена, в зависимости от B_1 (13)

Fig. 2. Maximum pressure in the process of blast opening when the venting structure is not embedded, depending on B_1 (13)

вом пике при различных значениях B_1 в зависимости от $1/\bar{S}_1$.

Из рис. 2 видно, что давление на первом пике растет с уменьшением \bar{S}_1 при постоянном B_1 . Точнее, давление растет по зависимости, близкой к линейной, с увеличением $1/\bar{S}_1$. Темп роста тем выше, чем меньше B_1 . При сохранении величины \bar{S}_1 давление будет тем больше, чем меньше B_1 . Это изменение можно охарактеризовать следующим образом. При каждом увеличении параметра B_1 в 2 раза давление уменьшается в 1,49–1,5 раза. При такой зависимости получается приблизительное соотношение:

$$\frac{P_{1, \bar{S}_1, 1}}{P_{1, \bar{S}_1, 2}} = \frac{1,495 \ln \eta}{\ln 2}, \tag{16}$$

где $\eta = B_{1,1}/B_{1,2}$; $B_{1,1}, B_{1,2}$ — два различных значения параметра B_1 .

Таким образом, если известно давление на первом пике при определенном значении \bar{S}_1 , то соотношение (16) дает возможность определить это давление при другом значении параметра B_1 при том же значении площади \bar{S}_1 и условии $K_1 = 1$. Чтобы предсказать величину давления при другом значении \bar{S}_1 , следует воспользоваться данными табл. 3 для опре-

Таблица 2. Безразмерная площадь проема в зависимости от допускаемого давления взрыва

Table 2. The dimensionless area of the opening depending on allowable explosion pressure

Площадь проема The area of the opening	Допускаемое давление взрыва \bar{P}_2 Allowable explosion pressure \bar{P}_2						
	2,48	4	6,25	9	16	25	49
\bar{S}_0	71	55,94	44,75	37,3	27,97	22,38	15,98
\bar{S}_1	20	15,75	12,6	10,6	7,88	6,3	4,5

Таблица 3. Связь между углом наклона линии $\Delta P_{(t)}(1/\bar{S}_1)$ и параметром B_1

Table 3. Relationship between the inclination angle of line $\Delta P_{(t)}(1/\bar{S}_1)$ and parameter B_1

B_1	1	2,5	5	10	20	40
$\tan\Delta P_{(t)}(1/\bar{S}_1)$	21	11,5	6,95	4,285	2,77	1,83

деления тангенса угла наклона линии $\Delta P_{(t)}(1/\bar{S}_1)$ при различных значениях параметра B_1 . Табл. 3 построена на основании данных, приведенных на рис. 2.

Значения наклона линии $\tan\Delta P_{(t)}(1/\bar{S}_1)$ для промежуточных значений параметра B_1 можно найти по линейной интерполяции.

На рис. 2 крайние правые точки соответствуют случаю, когда первый пик реализуется при полном открытии проема, т.е. при смещении ЛСК на величину $X_1 = S_0 / \Pi$. Если максимум не будет достигнут и в этом случае, то давление взрыва будет продолжать расти при постоянной площади истечения до момента достижения максимальной площади пламени. Легкосбрасываемая конструкция окажется в этом случае неэффективной. Левые концы всех линий на рис. 2 будут находиться в начале координат. В настоящей работе эта окрестность давлений не рассматривается, как практически неинтересная.

Абсолютное давление на первом пике определяется соотношением:

$$P_1 = P_{вск} + \bar{P}_1 P_{вск}.$$

Безразмерный прирост давления во время вскрытия проема устанавливается из рис. 2. В случае если давление вскрытия $P_{вск} = 1,5$ кПа, а $P_1 = 2,48$ кПа ($\bar{S}_1 = 20$, см. табл. 2), давление на первом пике будет превышать давление на втором при условии $B_1 < 6,5$.

При $P_2 = 4$ кПа и $\bar{S}_1 = 15,75$ это условие превратится в $B_1 < 1,95$. При $P_2 = 6,25$ кПа, $\bar{S}_1 = 12,6$ первый пик может быть выше второго только при условии $B_1 < 1$, а если $\bar{S}_1 < 9$, то при $B_1 = 1$. В рассмотренных выше вариантах легкосбрасываемая конструкция не была заглублена в проеме, т.е. $K_1 = 1$. Далее анализируются случаи с учетом заглубления ЛСК в проеме.

В случае заглубления ЛСК масштабом изменения давления является величина давления, соответствующая моменту выхода легкосбрасываемой конструкции из проема — $P_{отк}$.

Абсолютное давление на первом пике определяется как:

$$P_1 = K_1^3 P_{вск} + K_1^3 \bar{P}_1 P_{вск} = K_1^3 P_{вск} (1 + \bar{P}_1).$$

Далее следует анализ вскрытия заглубленных конструкций после открытия проема, т.е. после $t_{отк}$.

На рис. 3 представлена зависимость \bar{P}_1 от $1/\bar{S}_1$ при различных значениях K_1 и постоянном значении

$B_1 = 20$. Величина безразмерного прироста давления тем выше, чем меньше K_1 . Абсолютный прирост давления, наоборот, выше для больших значений K_1 , так как масштаб давлений при этом изменится в K_1^3 .

Абсолютное давление взрыва также растет с увеличением K_1 , что соответствует снижению параметра B (см. табл. 1).

Сравнение абсолютных давлений первого пика при $B_1 = 20$ и $\bar{S}_2 = 20,0$ при двух значениях $B = 50$ ($K_1 = 1,18$) и $B = 22,8$ ($K_1 = 1,2$) дает:

$$P_1 = 1,18^3 \cdot 1,5(1 + 0,00635) = 2,62 \text{ кПа} > P_2 = 2,48 \text{ кПа},$$

$$P_1 = 1,26^3 \cdot 1,5(1 + 0,0391) = 3,12 \text{ кПа} > P_2 = 2,48 \text{ кПа}.$$

Отдельно следует отметить влияние давления вскрытия на формирование взрывной нагрузки. Например, повышение давления вскрытия в разы ($P_{вск} = 3$ кПа) приводит к росту давления на первом пике при $\bar{S}_1 = 12,6$ до значений, превышающих величину P_2 . При этом значении давления вскрытия значение B_1 должно сохраняться за счет увеличения ρ_n или уменьшения периметра проемов, так как B_1 растет с повышением $P_{вск}$. Влияние отдельных характеристик ЛСК, взрыва и объема помещения на формирование взрывной нагрузки требует более подробного анализа.

На рис. 4 представлены результаты вычислений в координатах $B_1 \bar{S}_1 K_1^{4,5}$ и $\bar{P}_1 K_1^3$. Вычисления про-

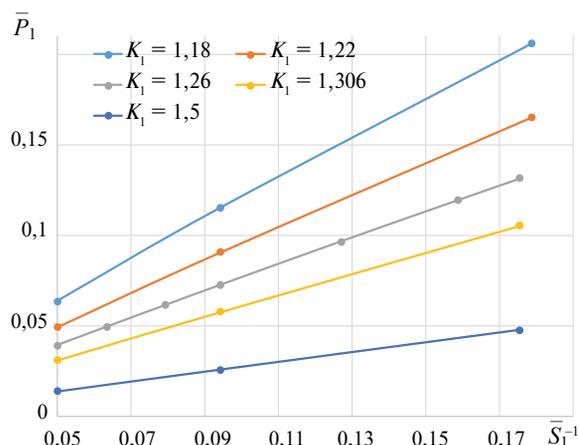


Рис. 3. Зависимость прироста давления после начала истечения от параметров $1/\bar{S}_1$ при различных значениях K_1 и постоянном значении $B_1 = 20$

Fig. 3. Dependence between the pressure rise after the onset of escape and $1/\bar{S}_1$ parameters at different K_1 values and the constant value of parameter $B_1 = 20$

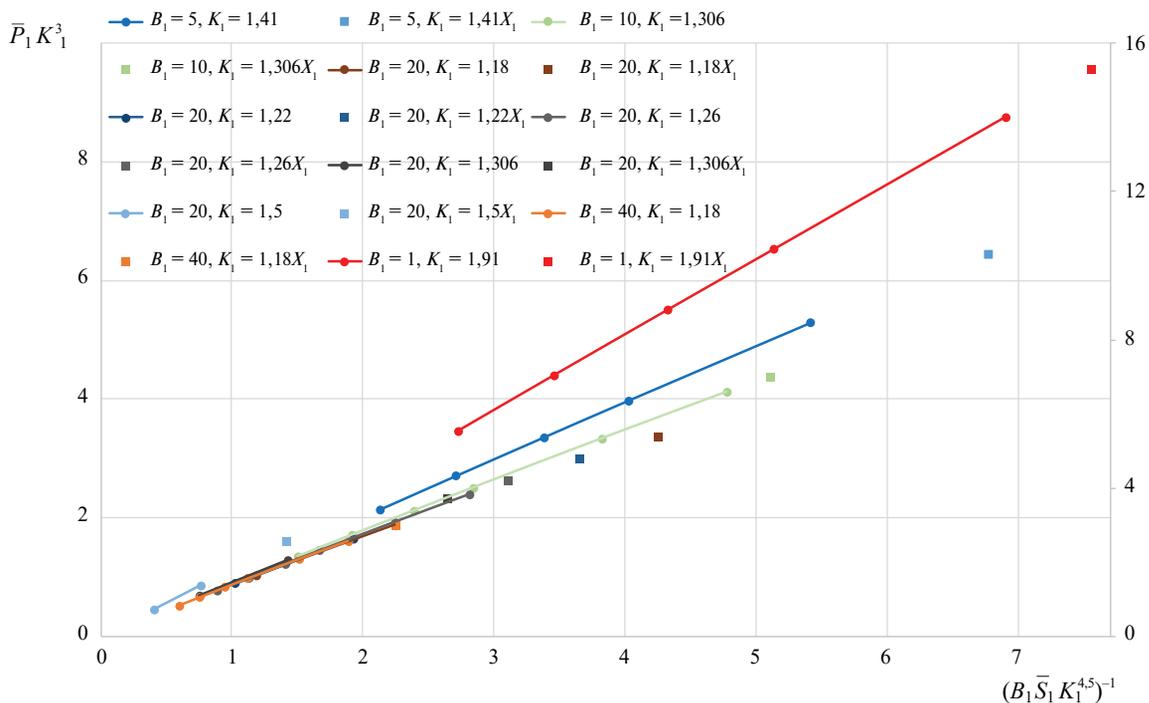


Рис. 4. Зависимость прироста давления после начала сброса от параметров $B_1 S_1$ и B
Fig. 4. Dependence between the pressure rise after the onset of discharge and parameters $B_1 S_1$ and B

водились преимущественно для случаев $B > B_1$, что равносильно условию $S_0 / X_0 \Pi > 1$, которое следует из (7) и (13). В строительной практике соотношение B/B_1 изменяется в пределах 1,2–5,0. Меньшие значения характерны для помещений небольшого объема с глубиной установки ЛСК, соответствующей глубине установки оконных блоков. Большие соотношения соответствуют промежуточным значениям с легко-сбрасываемыми конструкциями в виде облегченных панелей. На рис. 4 можно видеть место концентрации точек, которые соответствуют встречающимся в практике случаям. Абсолютное давление на первом пике для этих случаев можно описать выражением:

$$P_1 = P_{вск} K_1^3 \left(1 + \frac{95,3}{B_1 S_1 K_1^{7,5}} \right). \quad (17)$$

В месте концентрации расположены точки, соответствующие значениям $B_1 = 5, K_1 \leq 1,5$. В верхней части рисунка расположены данные для $B_1 = 1, K_1 \leq 1,91$. Уменьшение параметра K_1 до 1,49 (что соответствует $B_1 = 5$) способствует переходу точек в зону, находящуюся на линии продолжения зоны концентрации.

Исследование динамики давления при вскрытии незаглубленной легко-сбрасываемой конструкции показало, что она определяется в этом случае параметрами \bar{S}_1 и B_1 . Максимальное давление растет пропорционально \bar{S}_1^{-1} при любом B , и оно тем больше, чем меньше B_1 при постоянном значении

\bar{S}_1 . Последнее утверждение равносильно тому, что динамика давления на этой стадии развития взрыва определяется периметром проема, а не его площадью. Действительно, истечение происходит через боковые поверхности свободного пространства, имеющие площадь ΠX_1 . В случае заглубленных конструкций зависимость от параметров \bar{S}_1 и B_1 сохраняется. При этом добавляется зависимость от параметра B , который через параметр K_1 определяет давление открытия проема и скорость ЛСК при выходе из него. Результаты вычислений представлены графически и в виде интерполяционных выражений (16)–(17). Эти результаты абсолютно новые и дают возможность определять максимальное значение давления на стадии начального роста давления с учетом развития его сброса.

Выводы

Работа посвящена изучению динамики подъема давления при внутреннем дефлаграционном взрыве в помещении с момента начала взрыва и до формирования первого пика (максимума) давления. При этом учитывается влияние многих факторов: объем помещения, площадь и периметр проема, глубина установки легко-сбрасываемой конструкции в проеме, ее масса, давление вскрытия. В такой постановке задача решается впервые. В более ранних исследованиях [27] не учитывалось заглубление ЛСК и ее толщина, что приводит к занижению уровня давления. В других работах [28] рассматри-

вается динамика взрыва только до момента выхода легкобрасываемой конструкции из проема.

В представленном исследовании рассматривается динамика взрыва до момента формирования первого максимума давления с учетом стадии сброса давления после выхода ЛСК из проема.

В результате получены данные по характеру нагрузки на стадии ее нарастания в начальный момент взрыва, что важно знать для оценки величины и динамичности нагрузки. Зависимость изменения давления взрыва на этой стадии взрыва от безразмерных факторов дает возможность проектировать максимально эффективные легкобрасываемые конструкции. В работе введены два безразмерных фактора — S_1 и B_1 . До настоящего времени нагрузка на стадии нарастания давления принималась либо линейной, либо по кубическому закону в зависимости от времени [27]. В основополагающих работах [1, 2] для объемов, разгерметизирующихся в процессе взрыва, используется единственный безразмерный комплекс, который совпадает с комплексом для разгерметизиру-

ванного объема \bar{S}_0 (6), т.е. условия разгерметизации не учитываются. Для помещений малых объемов жилого комплекса, например для кухни, представленные результаты имеют важное значение, так как позволяют учесть быстрое развитие взрыва в малом объеме и глубину оконной рамы в проеме.

Случай $B_1 = B = 1$ (верхняя линия на рис. 4) соответствует случаю повышения избыточного давления на первом пике. Такая ситуация возможна только для малых объемов, около 10 м^3 , когда заглубление легкобрасываемой конструкции в проеме $X_0 = 0,25 \text{ м}$, а площадь проема S_0 и периметр Π дают $X_1 = S_0/\Pi = 1/4 = 0,25 \text{ м}$. Такие случаи требуют особого внимания и в дальнейшем более углубленного изучения.

После фазы нарастания давления следует фаза спада и новый подъем давления. Точное описание динамики давления в этих фазах связано с конкретной формой и размером помещения и, по-видимому, будет решаться с применением численных методов. Возможен также консервативный подход, при котором фаза спада давления не учитывается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bradly D., Mitcheson A.* The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. I // *Combustion and Flame*. 1978. Vol. 32. Pp. 221–236.
2. *Bradly D., Mitcheson A.* The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. II // *Combustion and Flame*. 1978. Vol. 32. P. 237.
3. *Moен I.O., Donato M.* Flame acceleration due to turbulent produced by obstacles // *Combustion and Flame*. 1980. Vol. 31. Pp. 21–30.
4. *Moен I.O., Donato M.* Turbulent flame propagation and acceleration in the Presents of Obstacles // *Progress in Astronomy and Aeronautics*. 1981. Vol. 75. Pp. 33–47.
5. *Eckhoff R.K., Fuhre K., Guirao C.M., Lee J.H.S.* Venting of turbulent gas explosions in a 50 м^3 chamber // *Fire safety journal*. 1984. Vol. 8. Pp. 191–197.
6. *Solberg D.M.* Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18-th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.
7. *Van Wingerden C.J.M.* On the rade acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination // *Combustion and Flame*. 1983. Vol. 51. Pp. 109–111.
8. *Medvedev S.P., Polenov A.N., Khomik S.V., Gelfand B.E.* Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion // *Symposium (International) on Combustion*. 1994. Vol. 25. Issue 1. Pp. 73–78.
9. *Phylaktou H., Andrews G.E.* The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // *Combustion and Flame*. 1991. Vol. 85. Issue 3–4. Pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
10. *Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzati N., Grenc A.R.* Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2000. Vol. 21. Issue 1–3. Pp. 109–116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
11. *Park D.J., Green A.R., Lee Y.S., Chen Y.C.* Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement // *Combustion and Flame*. 2007. Vol. 150. Issue 1–2. Pp. 27–39. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.005
12. *Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G.* Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles // *Journal of Hazardous Materials*. 30 September 2009. Vol. 169. Issue 1–3. Pp. 435–442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115
13. *Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. et al.* Large Eddy Simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles // *Flow Turbulence Combust.* 2009. Vol. 83. Pp. 227–250. DOI: 10.1007/s10494-008-9198-3
14. *Masri A.R., AlHarbi A., Meares S., Ibrahim S.S.* A comparative study of turbulent premixed flames propagating past repeated obstacles // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51. Issue 22. Pp. 7690–7703. DOI: 10.1021/ie201928g
15. *Molkov V.V., Eber R.M., Grigorash A.V., Tamanini F., Dobashi R.* Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers // *Journal of Loss Pre-*

- vention in the Process Industries. 2003. Vol. 16. Issue. 5. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/s0950-4230(03)00066-4
16. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Makarov D.V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers // *Journal of Hazardous Materials*. 2004. Vol. 116. Issue 1–2. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
 17. Горев В.А., Сальмова Е.Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легко-сбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13079703>
 18. Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
 19. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
 20. Нигметов Г.М., Сошенко М.В., Шмырев В.И. Подход к оценке нагрузок на сооружение после взрыва бытового газа // *Технологии гражданской безопасности*. 2018. Т. 15. № 1 (55). С. 28–32. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.5.28 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32721128>
 21. Gorev V. About dependence of parameters of internal explosion on the device of safety designs in apertures of the protecting walls of the production and residential buildings // VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018). 2018. Vol. 251. P. 02015. DOI: 10.1051/mateconf/201825102015
 22. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1425. Issue 1. P. 012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
 23. Gorev V. Actions of explosive loads of the protecting designs taking into account vibration combustion // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. Issue 4. P. 042047. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042047
 24. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Особенности развития газового взрыва в помещении при наличии смежной комнаты // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 3. С. 68–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.38-46
 25. Gorev V., Salyмова E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 04025. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025
 26. Gorev V., Chelekova E. Assessment of structural bearing capacity in case of internal explosion // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 02048. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302048
 27. Gorev V., Chelekova E. Internal explosion. Pressure peaks // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 02041. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302041
 28. Горев В.А., Мольков В.В. О зависимости параметров внутреннего взрыва от устройства предохранительных конструкции в проемах ограждающих стен промышленных и жилых здании // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 10. С. 6–25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25

REFERENCES

1. Bradly D., Mitcheson A. The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. I. *Combustion and Flame*. 1978; 32:221-236.
2. Bradly D., Mitcheson A. The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. II. *Combustion and Flame*. 1978; 32:237.
3. Moen I.O., Donato M. Flame acceleration due to turbulent produced by obstacles. *Combustion and Flame*. 1980; 31:21-30.
4. Moen I.O., Donato M. Turbulent flame propagation and acceleration in the Presents of Obstacles. *Progress in Astronomy and Aeronautics*. 1981; 75:33-47.
5. Eckhoff R.K., Fuhre K., Guirao C.M., Lee J.H. S. Venting of turbulent gas explosions in a 50 m³ chamber. *Fire Safety Journal*. 1984; 8:191-197.
6. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18-th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
7. Van Wingerden C.J.M. On the rade acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination. *Combustion and Flame*. 1983; 51:109-111.
8. Medvedev S.P., Polenov A.N., Khomik S.V., Gelfand B.E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion. *Symposium (International) on Combustion*. 1994; 25(1):73-78.
9. Phylaktou H., Andrews G.E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*. 1991; 85(3-4):363-379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
10. Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzate N., Grenc A.R. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. March 2000; 21(1-3):109-116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
11. Park D.J., Green A.R., Lee Y.S., Chen Y.C. Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confine-

- ment. *Combustion and Flame*. 2007; 150(1-2):27-39. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.005
12. Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 169(1-3):435-442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115
 13. Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. et al. Large Eddy Simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles. *Flow Turbulence Combust*. 2009; 83:227-250. DOI: 10.1007/s10494-008-9198-3
 14. Masri A.R., Al Harbi A., Meares S., Ibrahim S.S. A comparative study of turbulent premixed flames propagating past repeated obstacles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012; 51(22):7690-7703. DOI: 10.1021/ie201928g
 15. Molkov V.V., Eber R.M., Grigorash A.V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003; 1(5):395-402. DOI: 10.1016/s0950-4230(03)00066-4
 16. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Markarov D.V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 116(1-2):1-10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
 17. Gorev V.A., Salymova E.Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in industrial buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(2):41-44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13079703> (rus).
 18. Polandov Yu.K., Dobrikov S.A., Kukin D.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):5-14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14 (rus).
 19. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
 20. Nigmatov G., Soshenko M., Shmyrev V. Approach to the assessment of structural loads following household gas explosion. *Civil Security Technology*. 2018; 15:1(55):28-32. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.5.28 (rus).
 21. Gorev V. About dependence of parameters of internal explosion on the device of safety designs in apertures of the protecting walls of the production and residential buildings. *VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. 2018; 251:02015. DOI: 10.1051/mateconf/201825102015
 22. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
 23. Gorev V. Actions of explosive loads of the protecting designs taking into account vibration combustion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(4):042047. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042047
 24. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Effect of location source of fire in the room on the development of gas explosion. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):68-74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.38-46 (rus).
 25. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04025. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025
 26. Gorev V., Chelekova E. Assessment of structural bearing capacity in case of internal explosion. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02048. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302048
 27. Gorev V., Chelekova E. Internal explosion. Pressure peaks. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02041. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302041
 28. Gorev V.A., Molkov V.V. On the dependence of internal explosion parameters on the installation of safety structures in the apertures of the protecting walls of industrial and residential buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):6-25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25 (rus).

Поступила 05.05.2022, после доработки 25.05.2022;

принята к публикации 03.06.2022

Received May 5, 2022; Received in revised form May 25, 2022;

Accepted June 3, 2022

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Teacher of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Engineer of Laboratory at Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; ORCID 0000-0002-1383-574X; e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

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

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

Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов

Екатерина Валерьевна Головина¹, Андрей Владимирович Калач^{2,3}✉,
Оксана Владимировна Беззапнная¹, Александр Сергеевич Крутолапов⁴,
Сергей Владимирович Шарапов⁴

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

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

⁴Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из способов снижения пожарной опасности промышленных объектов является нанесение вспучивающихся огнезащитных покрытий. Известно, что огнезащитные интумесцентные составы являются многокомпонентными композиционными материалами, эффективность которых обусловлена сложными химическими превращениями между компонентами исследуемого огнезащитного материала при воздействии высоких температур. В связи с этим проблема исследования физико-химических процессов и теплофизических характеристик огнезащитных терморасширяющихся материалов является востребованной и актуальной.

Целью настоящей статьи является анализ теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах для повышения безопасности объектов нефтегазового комплекса.

Для реализации данной цели были решены следующие задачи:

- исследование методами термического анализа огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе акриловой дисперсии;
- анализ огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе водной дисперсии методами термического анализа;
- сравнительный анализ термоокислительной деструкции исследуемых огнезащитных материалов.

Методы. При проведении исследования основными методами были выбраны термогравиметрический анализ, дифференциально-термогравиметрический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия, метод квадрупольной масс-спектрометрии.

Результаты. В результате исследований методами синхронного термического анализа огнезащитных составов интумесцентного типа на акриловой и водной основах обнаружено сходство протекающих физико-химических процессов: наличие четырех основных этапов потери массы и высокий экзотермический эффект. Высокое значение теплового эффекта реакции свидетельствует о высокой горючести исследуемых огнезащитных материалов.

Выводы. На основании проведенного анализа сделан вывод, что огнезащитные составы интумесцентного типа на основе акриловой винилацетатной эмульсии и на основе водной дисперсии начинают утрачивать необходимые для огнезащитного материала эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Ключевые слова: пассивная огнезащита; вспучивающийся огнезащитный состав; промышленный объект; термогравиметрический анализ; дифференциально-термогравиметрический анализ; дифференциально-сканирующая калориметрия; метод квадрупольной масс-спектрометрии

Для цитирования: Головина Е.В., Калач А.В., Беззапнная О.В., Крутолапов А.С., Шарапов С.В. Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 24–33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33

✉ Калач Андрей Владимирович, e-mail: a_kalach@mail.ru

Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants

Ekaterina V. Golovina¹, Andrey V. Kalach^{2,3} ✉, Oksana V. Bezzaponnaya¹, Alexander S. Krutolapov⁴, Sergey V. Sharapov⁴

¹ Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

³ Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

⁴ Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the ways to reduce the fire hazard at industrial facilities is the application of intumescent coatings. It is known that intumescent compositions are multicomponent composite materials, whose effectiveness is due to complex chemical transformations of the components of the studied flame retardant exposed to high temperatures. In this regard, the problem of studying the physicochemical processes and thermophysical characteristics of flame retardant thermal expansion materials is in demand and relevant.

The purpose of this article is to analyze the thermophysical properties of water- and acrylic compound-based intumescent flame retardants to improve the safety of oil and gas facilities.

To accomplish this purpose, the following objectives were attained:

- studying acrylic dispersion-based intumescent flame retardant materials using methods of thermal analysis;
- analyzing aqueous dispersion-based intumescent flame retardant materials using methods of thermal analysis;
- making a comparative analysis of the thermo-oxidative degradation of the studied flame retardant materials.

Methods. During the study, thermogravimetric analysis, differential thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, and quadrupole mass spectrometry were chosen as the main methods.

Results. As a result of the studies performed using methods of synchronous thermal analysis of water- and acrylic compound-based intumescent flame retardants, the similarity of ongoing physicochemical processes was identified, including the presence of four main stages of mass loss and a high exothermic effect. This high thermal effect has proven high flammability of the studied flame retardant materials.

Conclusions. Following the analysis, the authors have concluded that intumescent flame retardants, containing acrylic vinyl acetate emulsion and aqueous dispersion, begin to lose their performance characteristics, necessary for a flame retardant material, when the temperature reaches approximately ~600 °C.

Keywords: passive fire protection; intumescent flame retardant; industrial facility; thermogravimetric analysis; differential thermogravimetric analysis; differential scanning calorimetry; quadrupole mass spectrometry method

For citation: Golovina E.V., Kalach A.V., Bezzaponnaya O.V., Krutolapov A.S., Sharapov S.V. Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):24-33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33 (rus).

✉ Andrey Vladimirovich Kalach, e-mail: a_kalach@mail.ru

Введение

Одним из способов снижения пожарной опасности промышленных объектов нефтегазового комплекса является нанесение вспучивающихся огнезащитных покрытий.

Для снижения разрушительных последствий пожаров современным исследователям необходимо постоянно расширять знания о теплофизических характеристиках огнезащитных материалов, прежде всего о теплопроводности, теплоемкости, термостойкости, тепловых эффектах физико-химических процессов.

В связи с этим проблема исследования физико-химических процессов и теплофизических характеристик огнезащитных терморасширяющихся

материалов является востребованной и актуальной. Огнезащитные интумесцентные составы являются многокомпонентными композиционными материалами, эффективность которых обусловлена сложными химическими превращениями между компонентами исследуемого огнезащитного материала при воздействии высоких температур.

Эффективным методом исследования теплофизических свойств огнезащитных материалов является метод синхронного термического анализа в связи с тем, что для проведения испытаний данным методом требуется малое количество исследуемого материала, быстрота получения результатов, точность проведенных исследований и относительно малая экономическая стоимость [1].

Целью настоящей статьи является анализ теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах для повышения безопасности объектов нефтегазового комплекса.

Для реализации данной цели были решены следующие задачи:

- исследование методами термического анализа огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе акриловой дисперсии;
- анализ огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе водной дисперсии методами термического анализа;
- сравнительный анализ термоокислительной деструкции исследуемых огнезащитных материалов.

Материалы и методы

При проведении исследования основными методами были термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), метод квадрупольной масс-спектрометрии [2–6].

Испытания методами синхронного термического анализа проводились с помощью синхронного термического анализатора STA 449 F 5 Jupiter («Netzsch» Германия), который внесен в Государственный

реестр средств измерений и имеет сертификат об утверждении типа средств измерений. Исследования проводились в платиновых тиглях (Pt/Rh), в среде воздуха (скорость подачи газа 75 мл/мин), со скоростью нагрева 20 °С/мин, ДСК держатель с сенсором S типа. Обработка полученных результатов проводилась с использованием программного обеспечения NETSCH Proteus Thermal Analysis.

Испытания методом масс-спектрометрии проводились с помощью квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 D Aëlos («Netzsch» Германия), интегрированного через нагреваемый адаптер с синхронным термическим анализатором. Снятие масс-спектров проводили в режиме Scan bargraf. Для идентификации спектров пользовались библиотекой спектров NIST Chemistry WebBook.

Объектами исследования выбраны огнезащитные вспучивающиеся составы на водной и акриловой основах [7–11].

Результаты и их обсуждение

Огнезащитные составы на основе акриловой дисперсии используются для повышения собственного предела огнестойкости металлоконструкций [12, 13].

В соответствии с данными термогравиметрического анализа, исследуемый огнезащитный материал характеризуется четырьмя основными этапами потери массы (рис. 1) [14, 15].

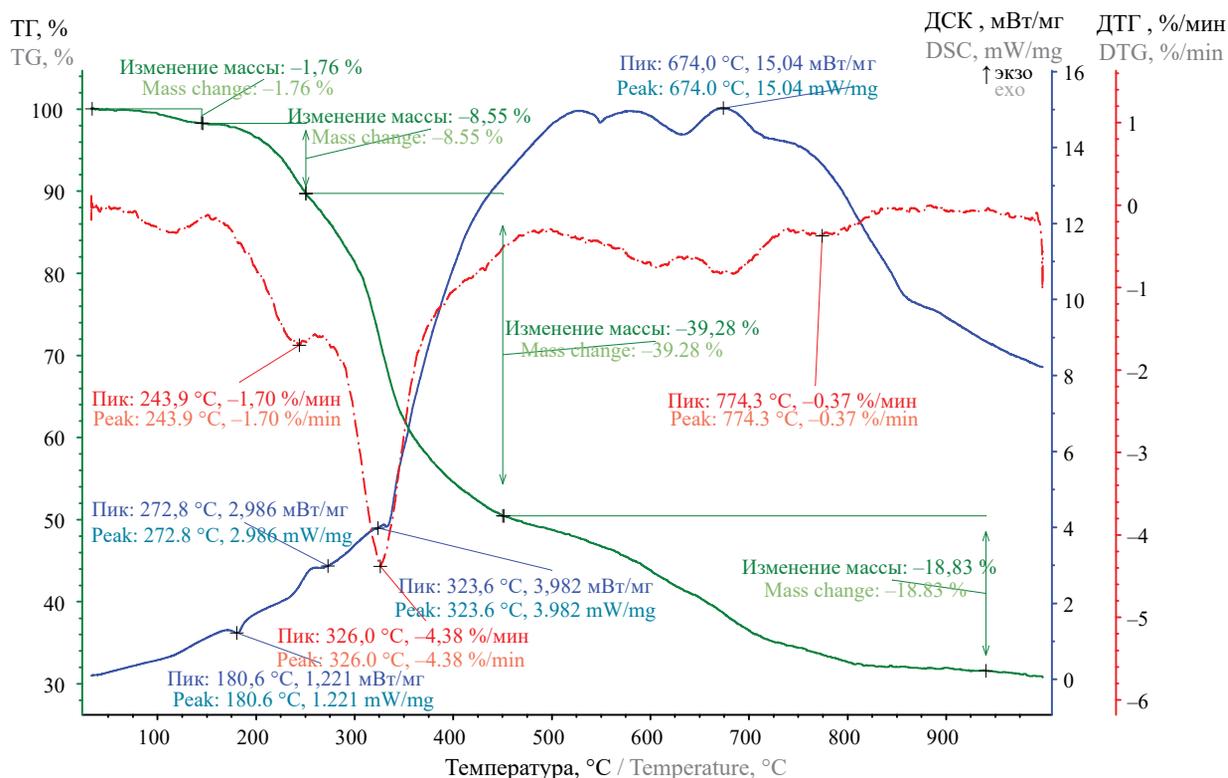


Рис. 1. Термограмма огнезащитного покрытия на основе акриловой дисперсии (среда испытания — воздух, скорость нагрева 20 °С/мин)

Fig. 1. Thermogram of an aqueous dispersion-based flame retardant (testing environment: air, heating rate: 20 °C/min)

Первые две ступени потери массы свидетельствуют о незначительных теплофизических изменениях. Наиболее сильная потеря массы наблюдается в интервале температур 250–450 °С и составляет 39,28 %.

Именно в этом температурном интервале происходят основные процессы интумесценции и формирование коксообразующих структур [16, 17]. Причем, четвертый этап потери массы (18,83 %) является результатом процесса горения пенококса.

На рис. 2–5 приведены данные исследуемого вспучивающегося огнезащитного материала методом квадрупольной масс-спектрометрии.

Зависимость ионного тока с массовыми числами $m/z = 44$ а.е.м. демонстрирует выделение CO_2 и характеризуется тремя пиками. Наиболее ярко выраженный пик наблюдается при температуре 380,8 °С.

Кривая ионного тока с массовыми числами $m/z = 30$ а.е.м. свидетельствует также о выделении NO (рис. 3).

При этом максимум ионного тока наблюдается при температуре 383,8 °С, именно при данной температуре в исследуемом огнезащитном материале происходит вспучивание и формирование коксообразующих структур.

При исследовании методом квадрупольной масс-спектрометрии в интервале температур 250–440 °С наблюдается выделение аминов с массовыми числами 55, 56 и 57 а.е.м. (рис. 4) и азолов (изоксазол, оксазол, триазол) с массовыми числами 68, 69 и 70 а.е.м. (рис. 5), которые также участвуют в процессе интумесценции и формировании пенококсовой структуры.

При исследовании огнезащитного вспучивающегося покрытия на акриловой основе методом

ДСК наблюдается резкое увеличение выделяемого тепла (экзотермический эффект) с ярко выраженным пиком при температуре 674,0 °С. Высокое значение теплового эффекта свидетельствует о высокой горючести исследуемого огнезащитного материала [18–20].

Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемый материал на основе акриловой дисперсии начинает утрачивать необходимые для огнезащитного состава эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе водной дисперсии

Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе водной дисперсии применяются для нанесения на стальные строительные конструкции с целью повышения их предела огнестойкости [18].

Термограмма анализируемого огнезащитного материала (рис. 6) свидетельствует о наличии трех основных этапов потери массы с наиболее интенсивной потерей массы (36,2 %) в интервале температур 250–450 °С.

Аналогично с огнезащитным составом на акриловой основе данный температурный интервал характеризуется процессом интумесценции с выделением азотсодержащих веществ.

В результате дифференциально-термогравиметрического анализа можно выделить четыре основных ДТГ пика. Наиболее ярко выраженным является ДТГ пик при температуре 326,2 °С, что согласуется с данными термогравиметрического анализа об интенсивности формирования пенококса.

В результате исследования огнезащитного материала методом ДСК установлен значительный экзотермический эффект, резкий рост которого наблюда-

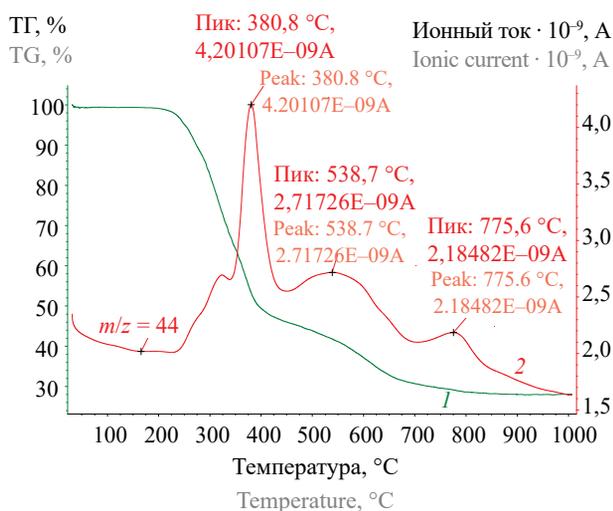


Рис. 2. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 44$ а.е.м.

Fig. 2. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 44$ u

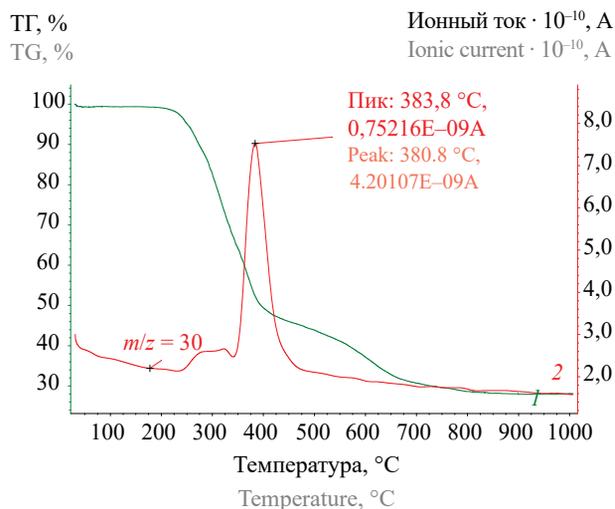


Рис. 3. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 30$ а.е.м.

Fig. 3. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 30$ u

ется при температуре 335,9 °С, свидетельствующий о высокой горючести исследуемого материала [12].

При проведении анализа методом масс-спектрометрии установлено, что максимальные значения

ионного тока наблюдаются при массовых числах: 17, 18 и 44 а.е.м. (рис. 7, 8).

Данный факт свидетельствует о процессе выделения паров воды, аммиака и углекислого газа

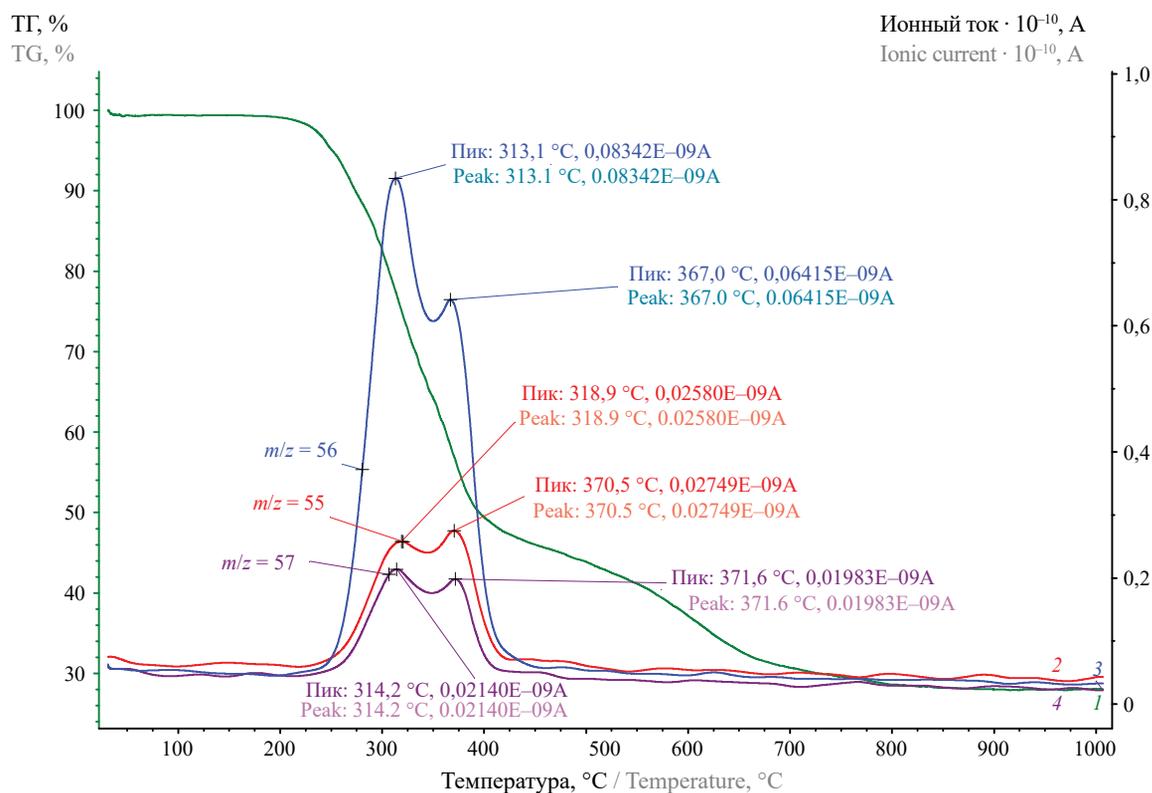


Рис. 4. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 55$ а.е.м., $m/z = 56$ а.е.м., $m/z = 57$ а.е.м.

Fig. 4. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 55$ u, $m/z = 56$ u, $m/z = 57$ u

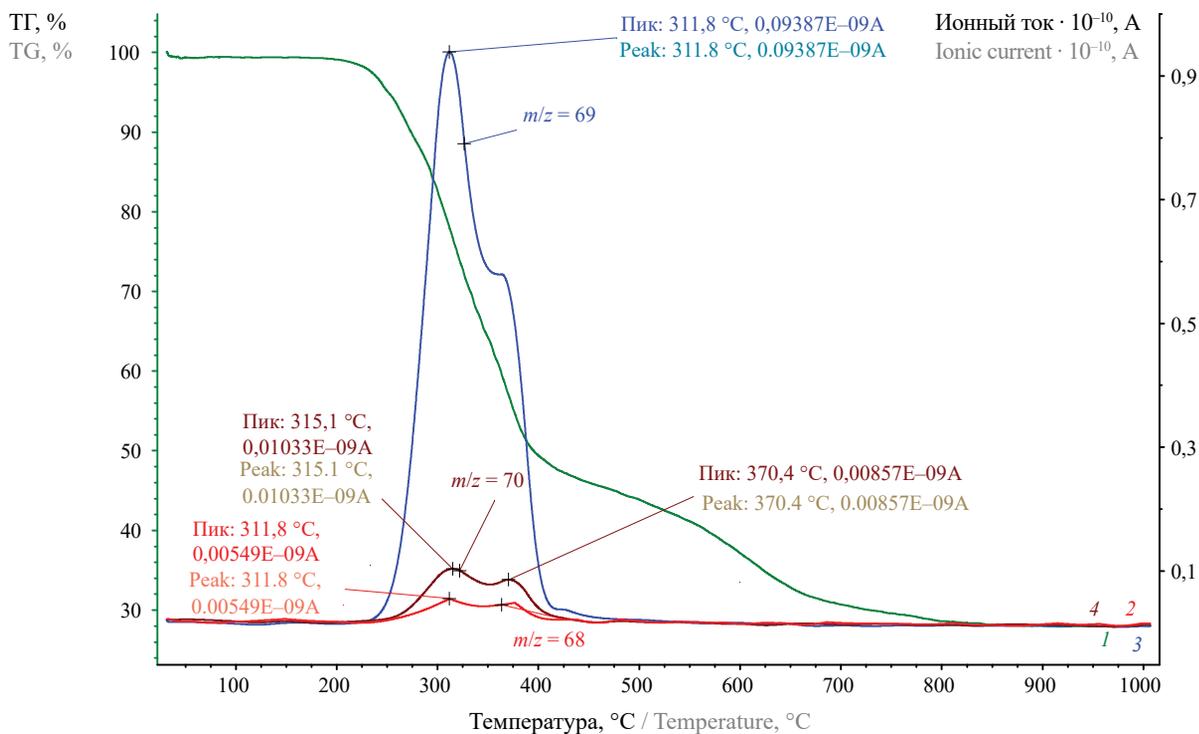


Рис. 5. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 57$ а.е.м., $m/z = 68$ а.е.м., $m/z = 69$ а.е.м., $m/z = 70$ а.е.м.

Fig. 5. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 57$ u, $m/z = 68$ u, $m/z = 69$ u, $m/z = 70$ u.

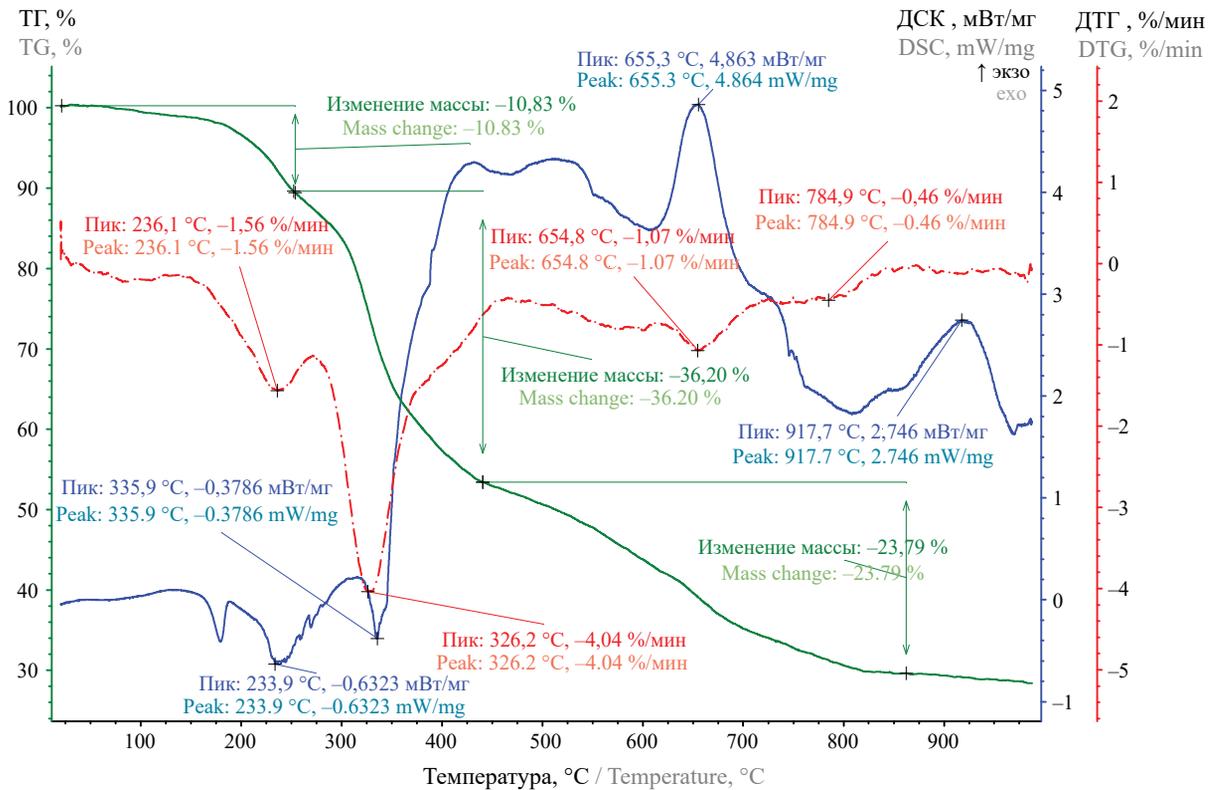


Рис. 6. Термограмма огнезащитного покрытия на основе водной дисперсии (среда испытания — воздух, скорость нагрева 20 °C/мин)

Fig. 6. Thermogram of an aqueous dispersion-based flame retardant (testing environment: air, heating rate: 20 °C/min)

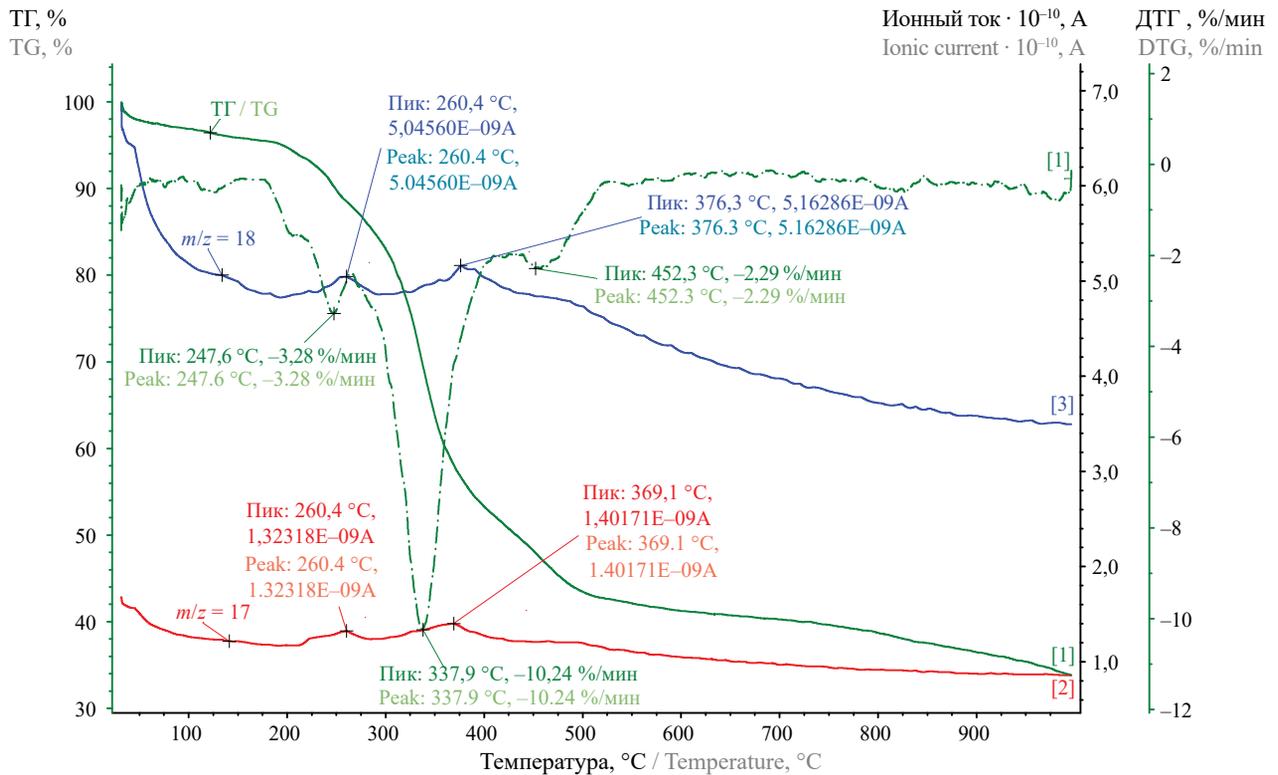


Рис. 7. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 17$ а.е.м. и $m/z = 18$ а.е.м.

Fig. 7. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 17$ u and $m/z = 18$ u

как результат образования пенококса и дальнейшей термодетрукции огнезащитного покрытия.

Выводы

В результате анализа теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах можно сделать вывод о схожести протекающих термических процессов у анализируемых материалов. Результаты анализа методами синхронного термического анализа свидетельствуют о низкой термостойкости анализируемых огнезащитных материалов, о чем свидетельствует высокая потеря массы и значительный экзотермический эффект.

Установлено, что огнезащитные составы интумесцентного типа на основе акриловой винилацетатной эмульсии и на основе водной дисперсии начинают утрачивать необходимые для огнезащитного материала эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Таким образом, опираясь на результаты исследований методами термического анализа,

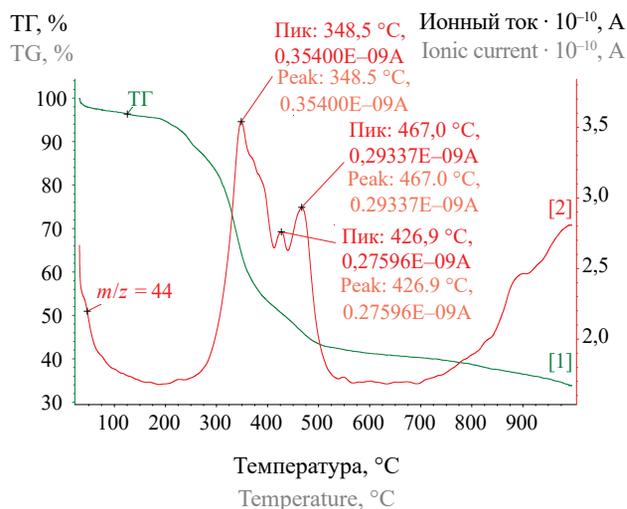


Рис. 8. Кривые ионного тока с массовым числом $m/z = 44$ а.е.м.

Fig. 8. Ionic current curves having mass number $m/z = 44$ u

делаем вывод, что данные составы не в полной мере обладают огнезащитными функциями для применения на объектах нефтегазового комплекса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наймушин Е.В., Дементьев Ф.А., Минкин Д.Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для оценки температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности (электронное издание). 2013. № 6 (52). Ст. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182>
2. Debbabi H., Mokni R., Jlassi I., Falconieri D., Piras A., Mastouri M. et al. Gas chromatography combined with mass spectrometry and flame ionization detection for identifying the organic volatiles from *Stachys arvensis*, *S. marrubifolia* and *S. ocymastrum* // International Journal of Mass Spectrometry. 2018. Vol. 432. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.ijms.2018.07.007
3. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Мансуров Т.Х. Особенности проведения испытаний огнезащитных материалов интумесцентного типа методом термического анализа в условиях углеводородного пожара // Техносферная безопасность. 2017. № 3 (16). С. 57–62.
4. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Мансуров Т.Х., Акулов А.Ю. Применение метода термического анализа для комплексного исследования и совершенствования вспучивающихся огнезащитных составов // Техносферная безопасность. 2017. № 2 (15). С. 3–7.
5. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base // Russian Journal of Applied Chemistry. 2018. Vol. 91. Issue 1. Pp. 96–100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
6. Groenewoud W.M. Characterisation of polymers by thermal analysis. Elsevier Science, 2001. 396 p.
7. Ravindra G. Puri, Khanna A.S. Intumescent coatings: A review on recent progress // Journal of Coatings Technology and Research. 2016. Vol. 14. Issue 1. Pp. 1–20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
8. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review // Journal of Fire Sciences. 2011. Vol. 29. Issue 3. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
9. Chao Zhang. Thermal properties of intumescent coatings in fire // Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires. 2015. Pp. 37–50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6_4
10. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю., Калач А.В., Шаранов С.В., Калач Е.В. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 12. С. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14–24
11. Головина Е.В., Беззапонная О.В., Акулов А.Ю., Мансуров Т.Х. Исследование огнезащитных свойств составов интумесцентного типа при огневых испытаниях в условиях углеводородного горения

- ния // Техносферная безопасность. 2018. № 4 (21). С. 75–81.
12. Зыбина О.В. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра тех. наук. СПб., 2015. 260 с.
 13. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. Issue 5. Pp. 429–434. DOI: 10.1557/s43577-021-00102-7
 14. Treven A., Saje M., Hozjan T. On a planar thermal analysis of intumescent coatings // *Fire and Materials*. 2017. Vol. 42. Issue 2. Pp. 145–155. DOI: 10.1002/fam. 2466
 15. Wladyka-Przybylak M., Kozlowski R. The thermal characteristics of different intumescent coatings // *Fire and Materials*. 1999. Vol. 23. Issue 1. Pp. 33–43. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199901/02)23:13.0.CO;2-Z
 16. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927>
 17. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспениваемых огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония. Литературный обзор // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813>
 18. Horrocks A.R., Price D. *Fire retardant materials*. Woodhead Publishing, 2001. 448 p.
 19. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part II: Mechanism of action in polypropylene-ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures // *Polymer Degradation and Stability*. 1984. Vol. 7. Issue 1. Pp. 25–31. DOI: 10.1016/0141-3910(84)90027-2
 20. Бабкин О.Э., Зыбина О.В., Мнацаканов С.С., Танклевский Л.Т. Механизм формирования пенококса при термоллизе интумесцентных огнезащитных покрытий // *Огнепортал*. URL: <http://www.ogneportal.ru/articles/coatings/2737>

REFERENCES

1. Naymushin E.V., Dement'ev F. A., Minkin D.Yu. Studying of gypsum method of synchronous thermal analysis for estimating temperature regime of heating. *Technology of technosphere safety*. 2013; 6(52):9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182> (rus).
2. Debbabi H., Mokni R., Jlassi I., Falconieri D., Piras A., Mastouri M. et al. Gas chromatography combined with mass spectrometry and flame ionization detection for identifying the organic volatiles from *Stachys arvensis*, *S. marrubiifolia* and *S. ocymastrum*. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2018; 432:59-64. DOI: 10.1016/j.ijms.2018.07.007
3. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Mansurov T.Kh. Features of testing of fire protection materials intumescent type by the method of thermal analysis in the conditions of a hydrocarbon fire. *Technosphere safety*. 2017; 3(16):57-62. (rus).
4. Bezzaponnaya O.V., Golovina Ye.V., Mansurov T. Kh., Akulov A.Yu. Application of the method of thermal analysis for the comprehensive study and improvement of the intumescent flame retardants. *Technosphere safety*. 2017; 2(15):3-7. (rus).
5. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018; 91(1):96-100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
6. Groenewoud W.M. *Characterisation of polymers by thermal analysis*. Elsevier Science, 2001; 396.
7. Ravindra G.P., Khanna A.S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016; 14(1):1-20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
8. Wei E. D. I Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review. *Journal of Fire Sciences*. 2011; 29(3):259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469
9. Chao Zhang. Thermal properties of intumescent coatings in fire. *Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires*. 2015; 37-50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6_4
10. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu., Kalach A.V., Sharapov S.V., Kalach E.V. Ways of improving the fire protecting thermal expanding compositions for use in oil and gas industry. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(12):14-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24 (rus).
11. Golovina Ye. V., Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu., Mansurov T.Kh. Study of fire retardant properties of intumescent compositions during fire tests in hydrocarbon combustion. *Technosphere safety*. 2018; 4(21):75-81. (rus).
12. Zybina O.V. *Teoreticheskiye printsipy i tekhnologiya ogneshchitnykh vspuchivayushchikhsya materialov: dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2015; 260. (rus).
13. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021; 46(5):429-434. DOI: 10.1557/s43577-021-00102-7
14. Treven A., Saje M., Hozjan T. On a planar thermal analysis of intumescent coatings. *Fire and Materials*. 2017; 42(2):145-155. DOI: 10.1002/fam.2466
15. Wladyka-Przybylak M., Kozlowski R. Thermal characteristics of different intumescent coatings. *Fire*

- and *Materials*. 1999; 23(1):33-43. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199901/02)23:13.0.CO;2-Z
16. Khalturinskiy N.A., Krupkin V.G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):33-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
 17. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(8):11-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus).
 18. Horrocks A.R., Price D. *Fire retardant materials*. Woodhead Publishing, 2001; 448.
 19. Camino G., Costa L., Trossarely L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. part ii: mechanism of action in polypropylene-ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*. 1984; 7(1):25-31. DOI: 10.1016/0141-3910(84)90027-2
 20. Babkin O.E., Zybina O.V., Mnatsakanov S.S., Tanklevskiy L.T. Mekhanizm formirovaniya penokoksa pri termolize intumestsentnykh ognezashchitnykh pokrytiy. *Ogneportal*. URL: <http://www.ogneportal.ru/articles/coatings/2737>

Поступила 10.03.2022, после доработки 9.05.2022;

принята к публикации 19.05.2022

Received March 10, 2022; Received in revised form May 9, 2022;

Accepted May 19, 2022

Информация об авторах

ГОЛОВИНА Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

КАЛАЧ Андрей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1-а; РИНЦ ID: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 119257; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

КРУТОЛАПОВ Александр Сергеевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 357500; ORCID: 0000-0003-0229-8501; e-mail: krutolapov75@inbox.ru

Information about the authors

Ekaterina V. GOLOVINA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Andrey V. KALACH, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Technical University, 20-letiya Oktyabrya St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1-a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ID RISC: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Oksana V. BEZZAPONNAYA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 119257; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Alexander S. KRUTOLAPOV, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Fire, Rescue Equipment and Automotive Industry, Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 357500; ORCID: 0000-0003-0229-8501; e-mail: krutolapov75@inbox.ru

ШАРАПОВ Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 759428; ORCID: 0000-0002-9053-0085; e-mail: sv.sharapov@inbox.ru

Вклад авторов:

Головина Е. В. — концепция исследования; компоновка результатов; написание исходного текста.

Калач А. В. — научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Беззапонная О. В. — развитие методологии; корректировка текста.

Крутолапов А. С. — подбор и анализ источников литературы.

Шарапов С. В. — сравнительный анализ образцов огнезащитных составов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Sergey V. SHARAPOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Criminology and Engineering Expertise, Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 759428; ORCID: 0000-0002-9053-0085; e-mail: sv.sharapov@inbox.ru

Contribution of the authors:

Ekaterina V. Golovina — the concept of the study; the layout of the results; writing the source text.

Andrey V. Kalach — scientific guidance; revision of the text; final conclusions.

Oksana V. Bezzaponnaya — methodology development; text correction.

Alexander S. Krutolapov — selection and analysis of literature sources.

Sergey V. Sharapov — comparative analysis of samples of flame retardants.

The authors declare no conflicts of interests.

Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи

Николай Викторович Барановский ✉, Виктория Андреевна Вяткина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Во время лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество загрязняющих веществ, в том числе и углеродистые частицы сажи. Повышенное содержание этих частиц в воздухе может привести к развитию у людей кардиореспираторных заболеваний или к летальному исходу. Замечено, что определенное количество сажевых частиц продуцируется на стадии пиролиза лесного горючего материала. В связи с этим целесообразно изучать закономерности процессов пиролиза и сажеобразования для разработки эффективных методов их прогнозирования и предотвращения.

Цель работы. Целью данного исследования является математическое моделирование теплопереноса в элементе типичного лесного горючего материала (лист березы) с учетом термического разложения сухого органического вещества и образования сажевых частиц.

Материалы и методы. В рамках работы проведено сценарное моделирование процессов теплопереноса в образце лесного горючего материала (листа березы), находящегося под воздействием высокотемпературной среды. При численном моделировании решались одномерное уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение с соответствующими начальными и граничными условиями. Полученная система дифференциальных уравнений решалась методом конечных разностей. Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Обработка графических результатов проводилась с помощью программного пакета OriginPro.

Результаты. При сценарном моделировании был учтен тип лесного пожара, период пожароопасного сезона, свойства лесного горючего материала, степень диспергирования лесного горючего материала, начальное влагосодержание элемента лесного горючего материала. Выявлено, что основное влияние оказывает степень диспергирования и вид лесного пожара. Также установлено подобие качественных характеристик процесса сажеобразования для всех видов лесных пожаров.

Выводы. Предложенная математическая модель может быть использована совместно с геоинформационными системами для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий.

Ключевые слова: прогнозирование лесной пожарной опасности; лист березы; сухое органическое вещество; температурное распределение; распределение фаз; кинетическая модель пиролиза; метод конечных разностей

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

Для цитирования: Барановский Н.В., Вяткина В.А. Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 34–44. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.34-44

✉ Барановский Николай Викторович, e-mail: firedanger@yandex.ru

Mathematical simulation of inert heating and pyrolysis of forest fuel under the influence of a forest fire front, if the process of sooting is taken into account

Nikolay V. Baranovskiy ✉, Viktoriya A. Vyatkina

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Large amounts of pollutants, including carbonaceous particles of soot, are released into the atmosphere during a forest fire. High concentrations of these particles in the air can lead to the development of

cardiorespiratory diseases or death. It has been noticed that a certain number of soot particles is produced at the stage of forest fuel pyrolysis. In this regard, it is advisable to study the processes of pyrolysis and sooting to develop effective methods of their prediction and prevention.

Goal of the study. The goal of this study is the mathematical simulation of heat transfer in an element of standard forest fuel (a birch leaf), taking into account the thermal decomposition of dry organic matter and sooting.

Materials and methods. Within the framework of the work, scenario modeling of heat and mass transfer processes in an element of forest fuel (a birch leaf), subjected to the influence of a high-temperature environment, was conducted. A one-dimensional heat transfer equation and a kinetic equation, having respective initial and boundary conditions, were solved by means of numerical simulation. The finite difference method was employed to solve the resulting system of differential equations. The calculations were conducted using the RAD Studio software package. Graphical results were processed using the OriginPro software package.

Results. Scenario modeling took into account the type of forest fire, the period of the fire hazard season, forest fuel properties, the degree of the forest fuel dispersion, and the initial moisture content in a forest fuel element. The authors have found that the major influence is made by the extent of dispersion and the type of forest fire. The similarity of qualitative characteristics of sooting has also been established for all types of forest fires.

Conclusion. The proposed mathematical model can be used in conjunction with geoinformation systems to visualize the initial and output information in the process of assessment, monitoring and forecasting of forest fires and their environmental consequences.

Keywords: forest fire danger prediction; birch leaf; dry organic matter; temperature distribution; phase distribution; kinetic model of pyrolysis; finite difference method

The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project No. 20-31-51001.

For citation: Baranovskiy N.V., Vyatkina V.A. Mathematical simulation of inert heating and pyrolysis of forest fuel under the influence of a forest fire front, if the process of sooting is taken into account. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):34-44. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.34-44 (rus).

✉ Nikolay Viktorovich Baranovskiy, e-mail: firedanger@yandex.ru

Введение

Лесные пожары оказывают существенное влияние на состояние здоровья людей, находящихся на лесопокрытых и населенных территориях [1, 2]. Во время лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество загрязняющих веществ, в том числе и углеродистые частицы сажи [3, 4]. В результате атмосферного переноса частицы сажи могут оказаться в воздухе, которым дышат люди [5]. Лесной пожар является многостадийным процессом [6], включающим такие этапы, как инертный прогрев лесного горючего материала, испарение влаги, термическое разложение сухого органического вещества, пламенное горение газообразных продуктов пиролиза и догорание коксового остатка. Уже на стадии пиролиза продуцируется определенное количество сажевых частиц [7]. Выделяются различные сценарии воздействия загрязненного воздуха на людей, например, нахождение людей в окрестностях активного лесного пожара или на территории промышленных объектов, расположенных в лесу. Однако где бы ни находились люди, дымовые или сажевые частицы оказывают воздействие, которое может привести к развитию кардиореспираторных заболеваний [8], а также к смертельному исходу [9]. Следовательно, необходимо изучить особенности как процесса сажеобразования, так и процессов непосредственно ему предшествующих.

Под процессом пиролиза понимают процесс термохимического разложения, при котором органический материал (биомасса) превращается

в твердое вещество с высоким содержанием углерода и летучее вещество при нагревании в отсутствие кислорода [10]. При лесных пожарах подразумевают окислительный пиролиз.

В настоящее время выделяется несколько подходов к моделированию процесса пиролиза биомассы. Для лучшего понимания механизмов пиролиза моделирование этого процесса ведется в рамках трех групп: механистических, сетевых и кинетических моделей [11]. В контексте изучения особенностей лесных пожаров целесообразно использовать кинетические модели, поскольку в данном случае не требуется большого количества структурных данных, и они могут быть получены экспериментально. Также данный подход достаточно простой и обеспечивает хорошую сходимость результатов.

Простейшим примером кинетических моделей является одноступенчатая глобальная кинетическая модель [12]. В рамках этой модели рассматривается одностадийная реакция преобразования биомассы в полукокк и летучие вещества. Такая модель основана на реакции Аррениуса [13]:

$$\frac{dV}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(V_{\infty} - V), \quad (1)$$

где t — время;

V — нормированная масса летучих веществ.

A и E — кинетические коэффициенты Аррениуса;

R — постоянная Аррениуса;

T — температура частицы;

V_{∞} — конечное значение V ;

Кинетические модели могут быть классифицированы на сосредоточенные (lumped) и распределенные (distributed) в зависимости от механизма реакции. В сосредоточенных моделях компоненты биомассы и продукты реакции разложения объединяются в три больших класса продуктов: газ, смола и коксовый остаток. Однако существует несколько механизмов первичных и вторичных реакций с образованием летучих веществ [14]. Концепция распределенных моделей предполагает образование продуктов пиролиза путем бесконечного числа независимых параллельных реакций. Все эти реакции имеют различные энергии активации, которые могут быть заданы различными функциями распределения [14, 15]. Основной задачей при моделировании процесса пиролиза является анализ динамики изменения фаз и также времени индукции образца.

Формирование сажи (дыма) в пламени обусловлено одновременным протеканием таких процессов как фрагментация углеродсодержащих продуктов разложения топлива, зарождения центров нуклеации части, роста частиц за счет осаждения на их поверхности газовых компонентов, а также столкновения и коагуляции частиц и гетерогенного окисления частиц. Наиболее активно процесс зарождения и поверхностный рост частиц сажи протекает в высокотемпературной зоне пламени [16]. Массовая доля аэрозольной эмиссии варьируется в диапазоне от 1–2 до 5–7 % от количества сгоревшей биомассы и определяется условиями горения [17]. Состав образовавшихся продуктов горения зависит от температуры и давления горения, а также от массовой доли химических элементов, из которых состоит ЛГМ. Соотношение массы твердых частиц дымового аэрозоля к массе сгоревшего лесного материала варьируется в зависимости от характеристик пожара. По некоторым экспериментальным данным при сгорании одной тонны лесных горючих материалов в атмосферу поступает около 24 кг твердых частиц [18]. Аэрозольная дымовая эмиссия включает в себя три типа химических веществ [17]:

- вещества минерально-почвенного происхождения (3–15 % от полной массы дымовой эмиссии) в виде химических окислов и солей таких элементов, как кальций, кремний, железо, цинк, алюминий и др., входящих в состав частичек почвы (пыли), поднятых в воздух восходящими потоками горячего дыма;
- органические вещества, характерные для химического состава горячей растительности (60–80 % от полной массы дымовой эмиссии), обычно это термически разложившаяся целлюлоза, древесные смолы, лигнины;
- элементный углерод (7–15 % от полной массы дымовой эмиссии) как результат обугливания

в частицах органического растительного материала и конденсированных продуктов его термической деструкции.

Проведенные исследования показывают, что размер частиц и их распределение в пространстве зависит от типа топлива, среды горения, условий горения, технологий измерения. Быстрое увеличение размера частиц происходит сразу после выброса частиц дыма. Пылающий огонь выделяет относительно больше частиц сажи, чем тлеющие огни [19]. Также ряд работ посвящен определению химического состава образовавшихся аэрозолей [20, 21]. Также установлено, что коэффициент выбросов определяется видом лесного горючего материала. Для большинства загрязняющих веществ в результате сжигания коры выделяется больше выбросов, чем при сжигании листьев и веток [22].

Таким образом, становится понятно, что стадия пиролиза влечет за собой начало образования сажевых частиц и дальнейшее загорание образца. Необходимо изучать закономерности этих процессов для разработки эффективных методов их прогнозирования и предотвращения. Целью данного исследования является математическое моделирование теплопереноса в элементе типичного лесного горючего материала (лист березы) с учетом термического разложения сухого органического вещества и образования сажевых частиц.

Физико-математическая постановка задачи

В качестве объекта исследования был выбран элемент лесного горючего материала — лист березы повислой. Выбор обусловлен широким ареалом распространения этого вида в различных регионах планеты (Россия, Европа, Центральная Азия, регионы Африки и Пиренейского полуострова) [23]. Стоит отметить, что данный вид часто произрастает в смешанных лесах, состоящих из других хвойных и лиственных пород, закономерности процесса загорания которых могут существенно отличаться. Значит, образец листа березы данного вида может стать причиной возможного лесного пожара.

Экспериментальные исследования по определению времени задержки загорания листа березы позволили выявить физико-химический механизм загорания данного лесного горючего материала. Сначала имеет место инертный прогрев образца, далее начинается процесс пиролиза сухого органического вещества, сопровождаемый выделением в атмосферу газообразных продуктов реакции разложения, а также сажевых частиц. Выделившиеся продукты смешиваются с кислородом воздуха в пристенной области листа, что вызывает воспламенение образца в газовой фазе. Разработанная математическая модель призвана повторить процессы инертного про-

грева, пиролиза и образования сажи для получения и оценки количественных и качественных характеристик тепломассопереноса [24].

В рамках математического моделирования предполагалось, что лист березы попадает во фронт лесного пожара (высокотемпературную среду), его поверхности прогреваются, далее начинается процесс пиролиза, сопровождающийся выделением газообразных продуктов и частиц сажи. Испарение влаги из образца не учитывалось. Предполагалось, что теплофизические параметры образца не зависели от температуры. Геометрическая постановка задачи приведена на рис. 1.

В рамках численного моделирования решались одномерное уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - q_p k \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right), \quad (2)$$

$$\rho_i \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -k \rho_i \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right), \quad (3)$$

$$\rho_s \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \alpha_s k \rho_s \varphi_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right). \quad (4)$$

Начальные и граничные условия записывались следующим образом:

$$t = 0, T_i = T_{i0}, \quad (5)$$

$$z = 0, -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha(T_1 - T_{ff}), \quad (6)$$

$$z = L_z; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha(T_3 - T_{ff}), \quad (7)$$

$$z = L_{z1}; -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, T_3 = T_2, \quad (8)$$

$$z = L_{z2}; -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, T_2 = T_1, \quad (9)$$

$$t = 0; \varphi_i = \varphi_{i0}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^4 \varphi_i = 1. \quad (11)$$

где ρ — плотность лесного горючего материала;
 c — удельная теплоемкость лесного горючего материала;

t — временная координата;

λ — коэффициент теплопроводности лесного горючего материала;

z — пространственная координата;

q_p — тепловой эффект реакции пиролиза лесного горючего материала;

k — предэкспонента пиролиза лесного горючего материала;

φ_1 — объемная доля сухого органического вещества;

φ_2 — объемная доля сажи;

φ_3 — объемная доля влаги;

φ_4 — объемная доля газовой смеси;

E — энергия активации пиролиза лесного топлива;

R — универсальная газовая постоянная;

α_s — коэффициент диспергирования;

α — коэффициент теплопередачи;

T_{ff} — температура пламени.

В ходе математического моделирования для решения дифференциальных уравнений применялся метод конечных разностей. Этот метод предполагает замену частных производных дифференциального уравнения на их конечноразностные аппроксимации. Область решения задачи представляет собой совокупность узлов. В результате замены частных производных на конечные разности получается незамкнутая система линейных алгебраических уравнений для вычисления температуры как локальной характеристики каждого узла сетки. Полученную систему замыкают с помощью разностных аппроксимаций для граничных условий и решают численным методом [25].

Поскольку в ходе математического моделирования рассматривались задачи, в которых область решения представляла собой разнородную структуру, в данном случае описания границы контакта использовалось граничное условие четвертого рода. На границе двух материалов задавались значения коэффициентов α_i и β_i . Решение полученной системы осуществляется методом прогонки с учетом неод-

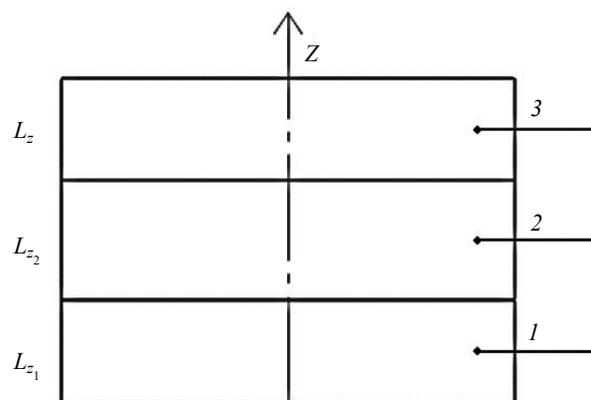


Рис. 1. Геометрическая постановка одномерной задачи теплопередачи в топливном элементе леса: 1 — слой сухого органического вещества; 2 — слой, представляющий смесь сухого органического вещества и воды; 3 — слой сухого органического вещества

Fig. 1. Geometric formulation of one-dimensional problem of heat transfer in a forest fuel element: 1 — a layer of dry organic matter; 2 — a layer that is a mixture of dry organic matter and water; 3 — a layer of dry organic matter

нородностей в элементе. Реализация вычислений осуществлялась с помощью программного пакета RAD Studio. Обработка графических результатов проводилась с помощью программного пакета OriginPro.

Выбор программного продукта для реализации вычислений обусловлен наличием компонентов, обеспечивающих работу с базами данных, что очень важно в контексте прогноза лесной пожарной опасности, поскольку современные системы мониторинга оперируют большим количеством разнородных данных [26]. Еще одним немаловажным преимуществом является возможность создания десктопных и мобильных приложений для разных операционных систем. Такая кроссплатформенность позволяет адаптировать написанный ранее программный код для работы в более сложных системах или запустить небольшой самостоятельный продукт. Также данный продукт позволяет проводить визуализацию данных внутри системы, что планируется реализовать по мере доработки математической модели [27].

Результаты и обсуждения

В данной работе был применен подход сценарного моделирования, описанный в [28]. При моделировании рассматривались четыре типа лесных пожаров: низовые лесные пожары низкой и высокой интенсивности, верховые лесные пожары и огненные штормы и три вида сезонов: весна, лето и осень.

Диапазоны параметров, используемых при моделировании

Ranges of parameters used in simulation

Температура среды, К Environment temperature, K	Начальная температура образца, К Initial temperature of the specimen, K	Время воздействия, с Exposure time, s	Коэффициент диспергирования Dispersion coefficient	Объемная доля влаги Volume ratio of moisture	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К) Heat loss coefficient, W/(m ² · K)
900 (Низовой пожар низкой интенсивности) (Low intensity surface fire)	279 (весна) (spring)	2; 3; 5	0,01; 0,03; 0,05	0,2; 0,3; 0,4	80
1000 (Низовой пожар высокой интенсивности) (High intensity surface fire)	293 (лето) (summer)				90
1100 (Верховой пожар) (Crown fire)	273 (осень) (autumn)				100
1200 (Огненный шторм) (Fire storm)					200

Диапазоны значений основных параметров, используемых при моделировании, приведены в таблице.

Выявим основные закономерности теплопереноса на примере сценария низового пожара низкой интенсивности для летнего периода. На рис. 2 отражены температурные поля образца для различных времен воздействия.

Анализ температурных распределений показывает, что основное влияние лесного пожара обусловлено длительностью экспозиции элемента лесного горючего материала. Видна заметная разница в распределении температуры по толщине березового листа при временах воздействия 2, 3 и 5 с. Однако градиенты температуры по толщине листа небольшие, так как листовая пластина достаточно тонкая и успевает прогреться почти по всей толщине листа. Температура окружающего воздуха не оказывает заметного влияния на распределение температуры в структуре березового листа. Также была проанализирована динамика изменения фаз образца (рис. 3).

Анализ распределения фаз позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, самое большое влияние оказывает сценарий продукции сажевых частиц, обусловленный значением коэффициента диспергирования. Чем больше значение этого коэффициента, тем выше значение объемной доли образовавшихся сажевых частиц. Например, значения объемной доли сажевых частиц достигают величины 0,005 при минимальном сценарии и 0,023 при максимальном

сценарии сажеобразования. Соответственно, летом и осенью эти значения составляют 0,005 и 0,03 также. Этот результат обусловлен заложенной в модель зависимостью кинетики сажеобразования от кинетики термического разложения сухого органического вещества. В свою очередь, согласно кинетической схеме, термическое разложение сухого органического вещества определяется температурой, которая достигается в элементе лесного горючего материала. Как было указано ранее, эти различия минимальны для различного периода пожароопасного сезона. Также следует отметить, что градиенты объемной доли сажевых частиц значительно выше при сценарии максимального сажеобразования. Причем, заметное образование сажевых частиц происходит при времени воздействия более 2 секунд, а максимальное их количество образуется на краях листа, где температура также максимальна, что обуславливает более интенсивное термическое разложение сухого органического вещества.

Кроме того, были проведены расчеты сажеобразования при различном влагосодержании лесного горючего материала. Зависимости изменения фаз с течением времени для этих случаев отражены на рис. 4.

Значения объемной доли влаги варьировались в диапазоне от 0,2 до 0,4. Анализ результатов показал, что с уменьшением объемной доли влаги образование сажевых частиц увеличивается. Эта разница в абсолютных значениях составляет порядка 0,01, т.е. происходит увеличение сажевых частиц примерно на треть при минимальном влагосодержании лесного горючего материала.

Ранее были проведены эксперименты по исследованию зажигания березового листа в трубчатой печи [24]. Согласно плану эксперимента, образец лесного горючего материала помещался в канал трубчатой печи до момента его пламенного сгорания. Процессы, происходящие в канале трубчатой печи, фиксировались с помощью высокоскоростной видеокамеры (скорость съемки 500 кадров в секунду). Визуально определялись моменты, когда происходило образование и выделение газообразных продуктов пиролиза, сопровождающееся образованием частиц сажи, и зажигание березового листа в газовой фазе. Установлено [24], что пиролиз сухого органического вещества происходит при времени порядка 0,2–1 с. При прочих равных в данной статье теоретически установлено, что пиролиз происходит при времени порядка 0,7–1,9 с. Разница в теоретических значениях составила в среднем 0,65 для различных сценариев математического моделирования. Указанные различия объясняются тем, что в эксперименте использовался предварительно высушенный образец лесного горючего материала. В данной же статье использован образец лесного горючего

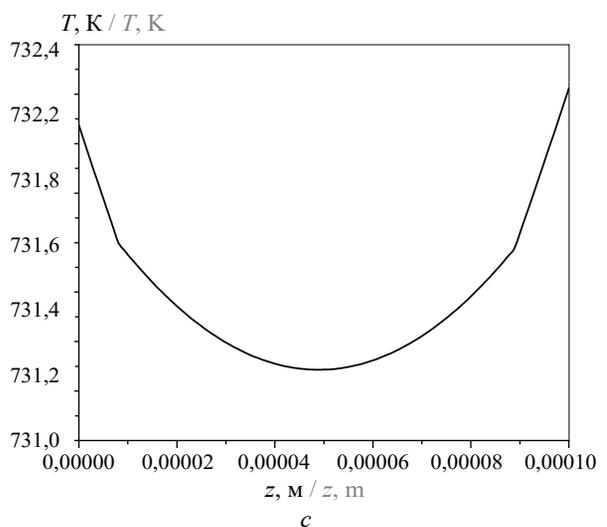
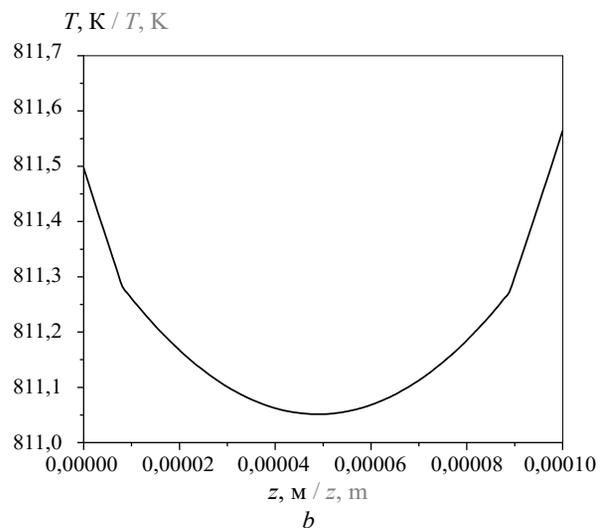
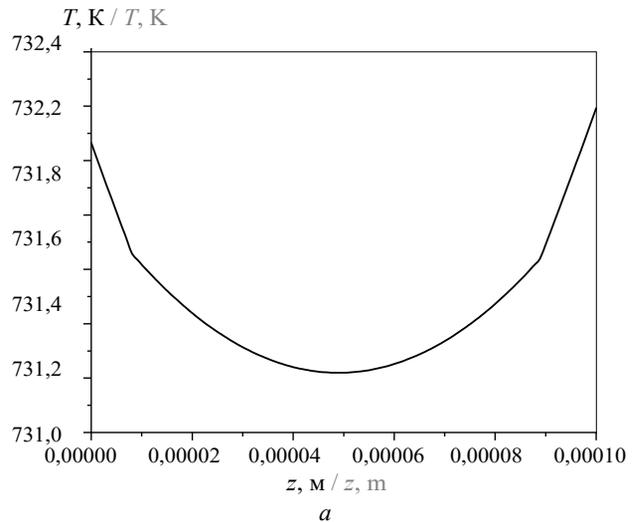


Рис. 2. Распределение температуры по толщине листа березы при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в различные моменты времени (лето, июль, +20 °С, $\varphi_{30} = 0,4$): а — $t = 2$ с; б — $t = 3$ с; с — $t = 5$ с

Fig. 2. Temperature distribution over the birch leaf thickness under the influence of a low-intensity surface fire at different moments in time (summer, July, +20 °C, $\varphi_{30} = 0,4$): а — $t = 2$ s; б — $t = 3$ s; с — $t = 5$ s

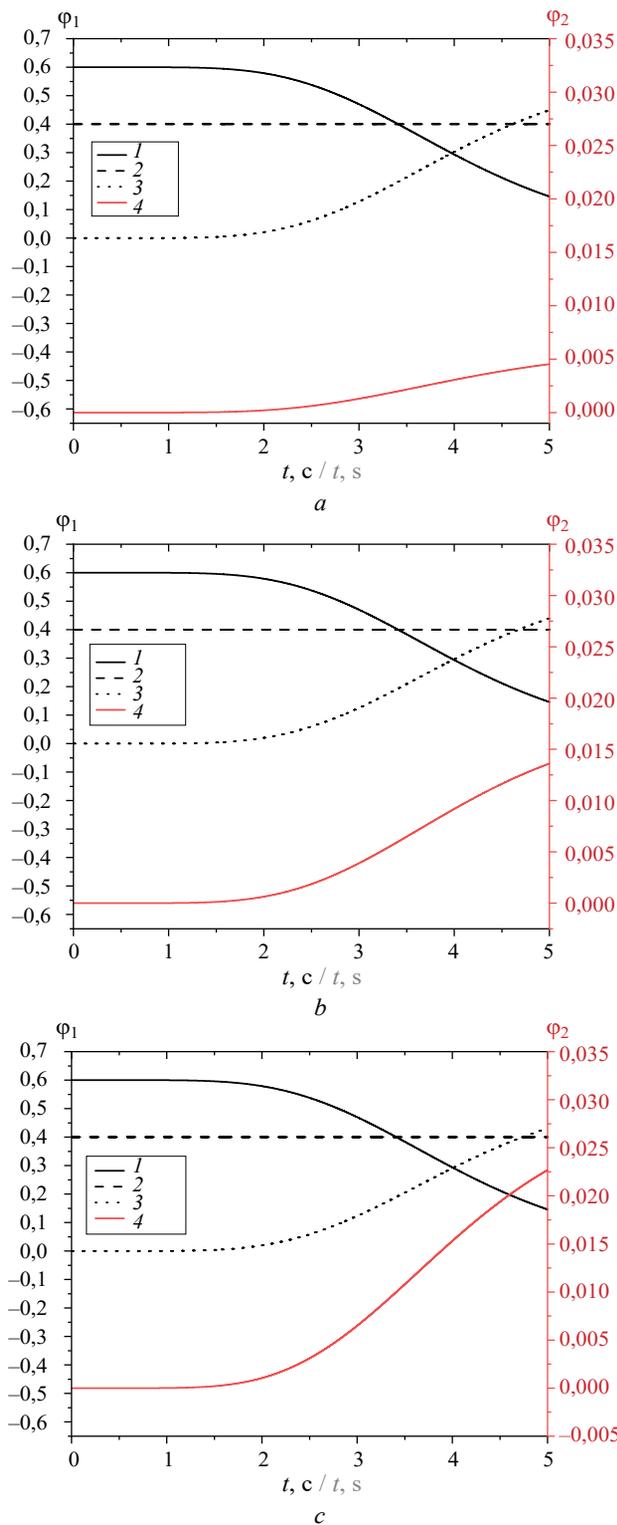


Рис. 3. Распределение объемных долей фаз при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в зависимости от времени (лето, июль, +20 °С, $\varphi_{30} = 0,4$) при различных значениях коэффициентов диспергирования: *a* — $\alpha_s = 0,01$; *b* — $\alpha_s = 0,03$; *c* — $\alpha_s = 0,05$ (*1* — сухое органическое вещество; *2* — влага; *3* — газ; *4* — частицы сажи)

Fig. 3. Distribution of volume fractions of phases under the influence of a low-intensity surface forest fire depending on time (summer, July, +20 °C, $\varphi_{30} = 0.4$) and different values of dispersion coefficients: *a* — $\alpha_s = 0.01$; *b* — $\alpha_s = 0.03$; *c* — $\alpha_s = 0.05$ (*1* — dry organic matter; *2* — moisture; *3* — gas; *4* — soot particles)

материала с ненулевым значением начальной влажности. В рамках данного исследования рассматривается лист березы, в центральном слое которого содержится влага. В статье рассмотрен сценарий, когда лист сорвался с ветки дерева и упал на поверхность почвы. Процессы влагообмена, характерные для живого листа, не рассматривались. Понятно, что погрешность математической модели относительно велика. Во-первых, это связано с различием условий проведения эксперимента. Во-вторых, лесной горючий материал представляет собой сложный неоднородный объект с развитой многомасштабной пористой структурой

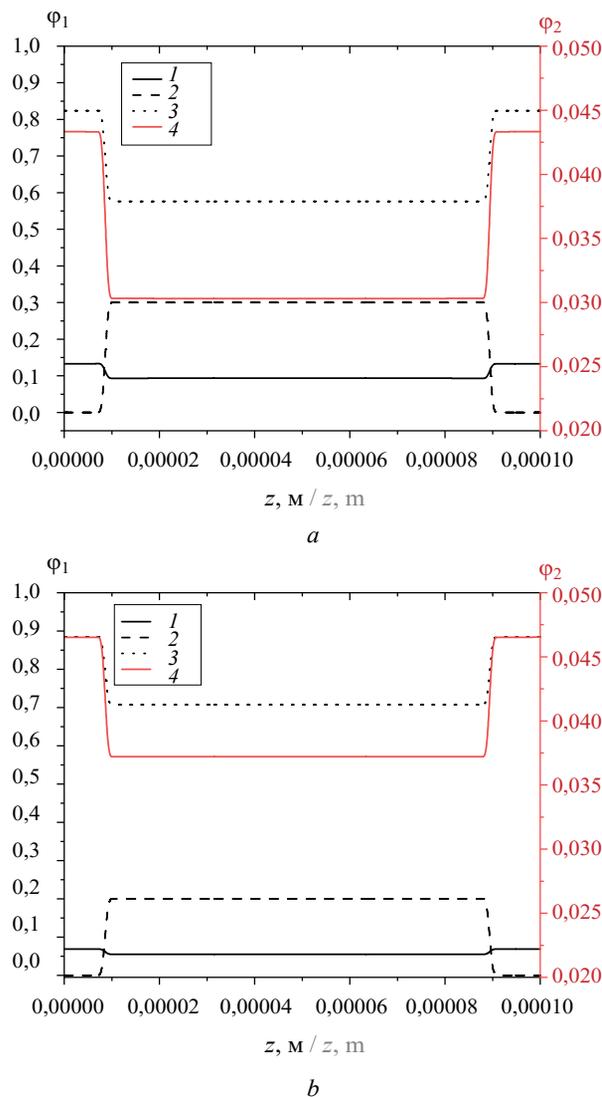


Рис. 4. Распределение объемных долей фаз при воздействии низового лесного пожара низкой интенсивности в момент времени $t = 5$ с при различных значениях объемной доли влаги (лето, июль, +20 °С, $\alpha_s = 0,05$): *a* — $\varphi_{30} = 0,2$; *b* — $\varphi_{30} = 0,3$ (*1* — сухое органическое вещество; *2* — влага; *3* — газ; *4* — частицы сажи)

Fig. 4. Distribution of volume fractions of phases under the influence of a low-intensity surface forest fire at the time $t = 5$ s for different values of the moisture volume fraction (summer, July, +20 °C, $\alpha_s = 0.05$): *a* — $\varphi_{30} = 0.2$; *b* — $\varphi_{30} = 0.3$ (*1* — dry organic matter; *2* — moisture; *3* — gas; *4* — soot particles)

[6]. Моделирование таких объектов — нетривиальная задача. Согласно [6], погрешность математических моделей в теории лесных пожаров составляет от 30 до 580 %. Поэтому полученные результаты можно считать удовлетворительно согласующимися с результатами эксперимента [24].

Выводы

В рамках работы проведено исследование процессов тепломассопереноса в образце лесного горючего материала (листа березы), находящегося под воздействием высокотемпературной среды. Одномерная математическая модель позволяет проводить расчеты в режиме опережения времени, что чрезвычайно важно в контексте прогноза лесной пожарной опасности. В работе использован подход сценарного моделирования, который учитывает тип лесного пожара, период пожароопасного сезона, свойства лесного горючего материала, степень диспергирования лесного горючего материала, начальное влагосодержание элемента лесного горючего материала. Этот подход позволяет провести анализ изменения температурных и фазовых полей и определить особенности поведения образца, а также уйти от неопределенности при задании объемных долей компонентов сухого органического вещества. Выявлено, что основное влияние оказывает степень диспергирования лесного горючего материала и вид лесного пожара. Также установлено подобие качественных характеристик

процесса сажеобразования для всех видов лесных пожаров.

По результатам исследований установлено, что самое большое влияние на количество выделяемых частиц оказывает сценарий продукции сажевых частиц, обусловленный значением коэффициента диспергирования. Так, значения объемной доли сажевых частиц достигают величины 0,005 при минимальном сценарии и 0,023 при максимальном сценарии сажеобразования. Также было обнаружено влияние объемной доли влаги образца на образование сажевых частиц. Уменьшение доли влаги ведет к увеличению количества образующихся частиц сажи. Эта разница в абсолютных значениях составляет порядка 0,01.

Предложенная математическая модель может быть использована совместно с геоинформационными системами для визуализации исходной и выходной информации при оценке, мониторинге и прогнозировании лесных пожаров и их экологических последствий. Разработанная математическая модель позволяет проводить сценарное моделирование достаточно быстро и получать необходимые количественные оценки, например, прогнозировать объем выделяющихся сажевых частиц по конкретной лесопокрытой территории, если будет известен породный состав древостоя и запас лесного горючего материала. Разработанная математическая модель может быть применена и для других лесных горючих материалов, относящихся к листовым породам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V.* Forest fire occurrences and ecological impact prediction. Novosibirsk: Siberian branch of the Russian academy of sciences, 2017. 259 p.
2. *Punsompong P., Pani S.K., Wang S., Bich Pham T.T.* Assessment of biomass-burning types and transport over Thailand and the associated health risks // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 247. P. 118176. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118176
3. *Castagna J., Senatore A., Bencardino M., D'Amore F., Sprovieri F., Pirrone N., Mendicino G.* Multiscale assessment of the impact on air quality of an intense wildfire season in southern Italy // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 761. P. 143271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143271
4. *Adam M.G., Tran P.T.M., Bolan N., Balasubramanian R.* Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 407. P. 124760. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124760
5. *Yoshizue M., Taketani F., Adachi K., Iwamoto Y., Tohji-ma Y., Mori T., Miura K.* Detection of aerosol particles from Siberian biomass burning over the Western North Pacific: 11 // *Atmosphere*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 11. Issue 11. P. 1175. DOI: 10.3390/atmos11111175
6. *Grishin A.M.* Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Tomsk : Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 407 p.
7. *Josephson A.J., Castaño D., Koo E., Linn R.R.* Zonal-based Emission source term model for predicting particulate emission factors in wildfire simulations // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. Issue 2. Pp. 943–971. DOI: 10.1007/s10694-020-01024-7
8. *Invally M., Kaur G., Kaur G., Bhullar S.K., Buttar H.S.* Health care burden of cardiorespiratory diseases caused by particulate matter and chemical air pollutants // *World Heart Journal*. 2017. Vol. 57. Issue 2. Pp. 303–317.
9. *Borchers-Arriagada N., Palmer A.J., Bowman D.M.J.S., Williamson G.J., Johnston F.H.* Health impacts of ambient biomass smoke in Tasmania, Australia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 17. Issue 9. P. 3264. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093264>

10. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. Pp. 1081–1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
11. Hameed S., Sharma A., Pareek V., Wu H., Yu Y. A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models // *Biomass Bioenergy*. 2019. Vol. 123. Pp. 104–122. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.008
12. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic modeling in biomass pyrolysis — A review // *Journal of Applied Sciences Research*. 2008. Vol. 4. Issue 12. Pp. 1627–1636.
13. Amini E., Safdari M., Johnson N., Weise D.R., Fletcher T.H. Pyrolysis kinetics of wildland vegetation using model-fitting methods // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. Vol. 157. P. 105167. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105167
14. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. Pp. 1081–1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
15. Cai J., Wu W., Liu R. An overview of distributed activation energy model and its application in the pyrolysis of lignocellulosic biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 36. Pp. 236–246. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.052
16. Асеева Р.М., Буй Динь Тхань, Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Выделение дыма при термическом разложении и горении древесины // *Лесной Вестник*. 2004. № 2. С. 99–103.
17. Samsonov Y.N., Ivanov V.A., McRae D. J., Baker S.P. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21. Issue 7. Pp. 818–827. DOI: 10.1071/WF11038
18. Kukhar I.V., Orlovskiy S.N., Martynovskaya S.N. Forest fires environmental impact study // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. Issue 5. P. 052061. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052061
19. Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 579. Pp. 1000–1034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.025
20. Макаров В.И., Попова С.А., Дубцов С.Н., Плехотниченко М.Е. Спектр размеров и химический состав дымовой эмиссии при УФ облучении в режиме тлеющего горения лесных материалов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 2. № 4. С. 196–201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36481590>
21. Barboni T., Leonelli L., Santoni P.A., Tihay-Felicelli V. Aerosols and carbonaceous and nitrogenous compounds emitted during the combustion of dead shrubs according to twigs' diameter and combustion phases // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 113. P. 102988. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102988
22. Guo L., Ma Y., Tigabu M., Guo X., Zheng W., Guo F. Emission of atmospheric pollutants during forest fire in boreal region of China // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 264. P. 114709. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114709
23. Бородина Н.А., Некрасов В.И., Некрасов Н.С., Петрова И.П., Плотникова Л.С., Смирнова Н.Г. Деревья и кустарники СССР. М. : Мысль, 1966. 639 с.
24. Барановский Н.В., Кириенко В.А. Исследование зажигания лесных горючих материалов в высокотемпературной среде // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 5. С. 1310–1315.
25. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск : Томский политехнический университет, 2007. 172 с.
26. Бухаров Т.А., Нафикова А.Р. About developing database applications using embarcadero rad studio and Microsoft Access // *Colloquium-journal*. 2019. № 12–3 (36). С. 42–44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304692>
27. Винокуров А.С., Баженов Р.И. Разработка кросс-платформенного мобильного приложения «GPS навигатор» в среде RAD Studio XE8 // *Постулат*. 2016. № 11 (13). Ст. 4.
28. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 153 с.

REFERENCES

1. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. *Forest fire occurrences and ecological impact prediction*. Novosibirsk, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 2017; 259. (rus).
2. Punsompong P., Pani S.K., Wang S., Bich Pham T.T. Assessment of biomass-burning types and transport over Thailand and the associated health risks. *Atmospheric Environment*. 2021; 247:118176. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118176
3. Castagna J., Senatore A., Bencardino M., D'Amore F., Sprovieri F., Pirrone N., Mendicino G. Multiscale assessment of the impact on air quality of an intense wildfire season in southern Italy. *Science of the Total Environment*. 2021; 761:143271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143271
4. Adam M.G., Tran P.T.M., Bolan N., Balasubramanian R. Biomass burning-derived airborne particulate matter in Southeast Asia: A critical review.

- Journal of Hazardous Materials*. 2021; 407:124760. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124760
5. Yoshizue M., Taketani F., Adachi K., Iwamoto Y., Tohjima Y., Mori T., Miura K. Detection of aerosol particles from Siberian biomass burning over the Western North Pacific: 11. *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020;11(11):1175. DOI: 10.3390/atmos11111175
 6. Grishin A.M. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Tomsk, Publishing House of the Tomsk State University, 1997; 407.
 7. Josephson A.J., Castaño D., Koo E., Linn R.R. Zonal-based emission source term model for predicting particulate emission factors in wildfire simulations. *Fire Technology*. 2021; 57(2):943-971. DOI: 10.1007/s10694-020-01024-7
 8. Invally M., Kaur G., Kaur G., Bhullar S.K., Buttar H.S. Health care burden of cardiorespiratory diseases caused by particulate matter and chemical air pollutants. *World Heart Journal*. 2017; 57(2):303-317.
 9. Borchers-Arriagada N., Palmer A.J., Bowman D.M.J.S., Williamson G.J., Johnston F.H. Health impacts of ambient biomass smoke in Tasmania, Australia. *International Journal of Environmental Research and Public Health. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020; 17(9):3264. DOI: 10.3390/ijerph17093264
 10. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 50:1081-1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
 11. Hameed S., Sharma A., Pareek V., Wu H., Yu Y. A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models. *Biomass Bioenergy*. 2019; 123:104-122. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.02.008
 12. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic modeling in biomass pyrolysis — A review. *Journal of Applied Sciences Research*. 2008; 4(12):1627-1636.
 13. Amini E., Safdari M., Johnson N., Weise D.R., Fletcher T.H. Pyrolysis kinetics of wildland vegetation using model-fitting methods. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021; 157:105167. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105167
 14. Sharma A., Pareek V., Zhang D. Biomass pyrolysis — A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 50:1081-1096. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.193
 15. Cai J., Wu W., Liu R. An overview of distributed activation energy model and its application in the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 36:236-246. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.052
 16. Aseeva R.M., Thanh B.D., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Emission of smoke during thermal decomposition and combustion of wood. *Forest Bulletin*. 2004; 2:99-10. (rus).
 17. Samsonov Y.N., Ivanov V.A., McRae D.J., Baker S.P. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia. *International Journal of Wildland Fire*. 2012; 21(7):818-827. DOI: 10.1071/WF11038
 18. Kukhar I.V., Orlovskiy S.N., Martynovsakaya S.N. Forest fires environmental impact study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548(5):052061. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052061
 19. Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *Science of The Total Environment*. 2017; 579:1000-1034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.025
 20. Makarov V.I., Popova S.A., Dubtsov S.N., Plokhotnichenko M.E. Size distribution and the chemical composition of smoke emission under uv irradiation upon smoldering combustion of forest fuels. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018; 2(4):196-201. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36481590> (rus).
 21. Barboni T., Leonelli L., Santoni P.A., Tihay-Fellicelli V. Aerosols and carbonaceous and nitrogenous compounds emitted during the combustion of dead shrubs according to twigs' diameter and combustion phases. *Fire Safety Journal*. 2020; 113:102988. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102988
 22. Guo L., Ma Y., Tigabu M., Guo X., Zheng W., Guo F. Emission of atmospheric pollutants during forest fire in boreal region of China. *Environmental Pollution*. 2020; 264:114709. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114709
 23. Borodina N.A., Nekrasov V.I., Nekrasova N.S., Petrova I.P., Plotnikova L.S., Smirmova N.G. *Trees and shrubs of the USSR*. Moscow, Mysl' Publ., 1966; 639. (rus).
 24. Baranovskiy N.V., Kirienko V.A. Investigation of the ignition of forest combustible materials in a high-temperature environment. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020; 93(5):1310-1315. (rus).
 25. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Difference methods for solving heat conduction problems*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2007; 172. (rus).
 26. Bukharov T.A., Nafikova A.R. About developing database applications using embarcadero rad studio and Microsoft Access. *Colloquium-journal*. 2019; 12-3(36):42-44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304692> (rus).
 27. Vinokurov A.S., Bazhenov R.I. Developing cross-platform mobile app "GPS Navigator" in the environment RAD Studio XE8. *Postulate*. 2016; 11(13):4. (rus).
 28. Baranovskiy N.V. *Mathematical modeling of the most probable scenarios and conditions for the occurrence of forest fires : dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences*. Tomsk, 2007; 153. (rus).

Поступила 08.04.2022, после доработки 05.05.2022;
принята к публикации 16.05.2022

Received April 8, 2022; Received in revised form May 5, 2022;
Accepted May 16, 2022

Информация об авторах

БАРАНОВСКИЙ Николай Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; РИНЦ ID: 127290; Scopus Author ID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

ВЯТКИНА Виктория Андреевна, аспирант Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus Author ID: 57219222597; ORCID: 0000-0002-0997-4747; e-mail: kirienkvik@gmail.com

Вклад авторов:

Барановский Н.В. — научное руководство; концепция исследования; разработка и верификация математической модели; доработка текста; итоговые выводы.

Вяткина В.А. — разработка и верификация математической модели; обработка результатов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolay V. BARANOVSKIY, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Butakov Research Center, School of Energy & Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Prospekt, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; ID RISC: 127290; Scopus Author ID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

Viktoriya A. VYATKINA, Postgraduate Student of the Butakov Research Center, School of Energy & Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Prospekt, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus Author ID: 57219222597; ORCID: 0000-0002-0997-4747; e-mail: kirienkvik@gmail.com

Contribution of the authors:

Baranovskiy N.V. — scientific management; research concept; methodology development; development and verification of the mathematical model; final conclusions.

Vyatkina V.A. — development and verification of the mathematical model; processing results; writing the original text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности бетона и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций

Анатолий Никитович Гаращенко¹ ✉, Сергей Порфирьевич Антонов²,
Андрей Игоревич Данилов³, Владимир Валерьевич Павлов⁴,
Николай Сергеевич Новиков⁴

¹ ООО «ПРОЗАСК», г. Москва, Россия

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

³ ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ 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. Рассмотрена проблема предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения требуемой огнестойкости железобетонных конструкций. Ее актуальность обусловлена недостаточным объемом как огневых испытаний таких конструкций под нагрузкой, так и теплотехнических расчетов, необходимых для объективного анализа их результатов.

Цель и задачи. Обоснование выбора эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости конструкций. Для этого организовано проведение серии огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия при наличии и отсутствии полипропиленовой микрофибры в составе бетона и при использовании конструктивной огнезащиты, а также обеспечено проведение теплотехнического анализа полученных результатов.

Методы. Оценивалась огнестойкость натуральных образцов колонн и плит по стандартизованной методике в ходе испытаний в огневой печи под нагрузкой с проведением дополнительных термометрических измерений, результаты которых использовались в ходе теплотехнического анализа. Анализ проводился с использованием методик и программ численных расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой в одномерной и двумерной постановке.

Результаты. Получены дополнительные данные огневых экспериментов при проведении испытаний под нагрузкой, подтверждающие эффективность введения в состав бетона микрофибры как средства для предотвращения взрывообразного разрушения колонн и плит из тяжелого бетона и обеспечения их высоких пределов огнестойкости (R 120 и R 150, при постоянной статической нагрузке). Продемонстрирована роль и особенности использования для этой цели конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ». Приведены примеры, демонстрирующие целесообразность и эффективность проведения теплотехнических расчетов в одномерной и в двумерной постановке в качестве инструмента для анализа результатов проведенных испытаний. Показана возможность пересчета результатов измерений при экспериментах на другие условия, что необходимо для принятия обоснованных технических решений по огнестойкости железобетонных конструкций, подобных испытанным, а также по их рациональной огнезащите.

Выводы. Проведенные огневые эксперименты и результаты их тщательного теплотехнического анализа позволили получить значительный объем важной информации, необходимой для обеспечения заданной огнестойкости несущих железобетонных колонн и плит перекрытия и дальнейших путей развития данного важного направления экспериментальных и теоретических исследований. Продемонстрирована эффективность теплотехнических расчетов как инструмента для оценки параметров огнестойкости и огнезащиты железобетонных конструкций и возможность сокращения с их помощью количества дорогостоящих огневых испытаний.

Ключевые слова: полипропиленовая микрофибра; конструктивная огнезащита; теплотехнические расчеты; статическая нагрузка; теплофизические характеристики

Для цитирования: Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С. Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 45–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64

✉ Гаращенко Анатолий Никитович, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance

Anatoliy N. Garashchenko¹✉, Sergey P. Antonov², Andrey I. Danilov³, Vladimir V. Pavlov⁴, Nikolay S. Novikov⁴

¹ PROZASK, LLC, Moscow, Russian Federation

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

³ Research Center of Hazardous Fire Factors, LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴ 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 authors focus on preventing the explosive spalling of concrete and the fireproofing of reinforced concrete structures. The relevance of this issue is explained by the insufficient number of fire tests of such structures under loading and thermal engineering calculations, needed for an objective analysis of testing results.

Goal and objectives. The authors analyze the results of a series of fire tests, involving concrete columns and slabs with and without polypropylene microfiber, if no fireproofing is applied, as well as the results of the same tests involving the same items fireproofed by plates or plaster.

Methods. The fire resistance of full-scale specimens of concrete was evaluated according to a standardized testing in a fire furnace under loading. It encompasses additional thermocouple measurements used to make a thermal engineering analysis. The analysis entailed both one- and two-dimensional problem formulations, methods and programmes for the numerical computation of non-stationary temperature fields in fireproof structures.

Results. New data, obtained in the course of the fire experiments, show the efficiency of the polypropylene microfiber used to prevent the explosive spalling of concrete. The fire resistance limit is R 120 and R 150 under constant static loading. The fire resistance limit of similar structures, fireproofed by PROSASK Firepanel plates or IGNIS LIGHT plaster, was demonstrated. The specimens show the efficiency of methods and programmes for the one- and two-dimensional numerical analysis of non-stationary temperature fields in fireproof structures. The calculation results are presented for various fireproofing options.

Conclusions. The testing results and their thermal analysis represent important items of information necessary to ensure the fire safety and the pre-set fire resistance of concrete structures under loading. They can also be used to outline the development pattern of this experimental and theoretical research project. The efficiency of thermal engineering calculations as a tool for evaluating fire protection parameters and the fire resistance of concrete structures is demonstrated, also as an option to reduce the number of expensive fire tests.

Keywords: polypropylene microfiber; fireproofing of structures; thermal engineering calculations; static loading; thermophysical characteristics

For citation: Garashchenko A.N., Antonov S.P., Danilov A.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):45-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64 (rus).

✉ Anatoliy Nikitovich Garashchenko, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Введение

Вопросы обеспечения заданной огнестойкости несущих строительных конструкций из железобетона (колонн, плит перекрытия, туннелей обделки тоннелей и пр.), применяемых при строительстве, относятся к числу наиболее важных применительно к обеспечению пожарной безопасности объекта. Нормативными документами предписано, что для обеспечения (подтверждения) пределов огнестойкости необходимо проведение огневых экспериментов при действии проектных нагрузок на конструкции, однако до настоящего времени объем таких испытаний не соответствовал реальным потребностям.

Особенностью конструкций из железобетона является вероятность взрывообразного (хрупкого) разрушения и взрывообразной потери целостности (ВПЦ) защитного слоя бетона с последующим оголением и сверхнормативным прогревом арматурного каркаса, вплоть до образования сквозных отверстий или полного разрушения. Причины хрупкого разрушения бетона при пожаре доподлинно не известны, но предполагается, что в основе явления лежит переход существующих до нагрева или вновь образовавшихся при нагреве микротрещин в структуре бетона из равновесного состояния в неравновесное и спонтанное их развитие под действием напряжений и давления водяного пара. Также известно, что про-

цесс хрупкого разрушения зависит от состава бетона и наиболее характерен для конструкций из высокопрочных (т.н. «тяжелых») бетонов, в особенности при повышенном уровне их влажности [1–11]. Взрывообразное разрушение происходит тогда, когда напряжения, возникающие в бетоне при эксплуатационных нагрузках, усиливаются вследствие внутреннего повышения давления паров физической и химически связанной воды в бетоне и в результате превышают предел сопротивления бетона растяжению. Наибольшее количество публикаций, посвященных экспериментальным и расчетным оценкам работоспособности железобетонных конструкций из тяжелых бетонов (с фактами их ВПЦ), посвящено тубингам обделки транспортных тоннелей [4–9].

Из трудов научного сообщества известно, что одним из действенных способов предотвращения (или снижения вероятности) ВПЦ и, следовательно, обеспечения фактического предела огнестойкости железобетонных конструкций до требуемого значения является использование полипропиленовой микрофибры (ППМФ) [4, 5, 8–18]. Это нашло отражение в руководящих нормативных документах как в европейских (EN 1992-1-2:2009 (02250) Еврокод 2. «Проектирование железобетонных конструкций»). Часть 1–2. «Общие правила определения огнестойкости»), так и российских (СП 468.1325800.2019. «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности»).

Имеются следующие представления о механизме ее влияния на работоспособность конструкций [13]. При нагреве происходит плавление полипропилена, и в бетоне образуются микроканалы, обеспечивающие снижение уровня напряжений, возникающих из-за роста давления паров влаги в порах бетона. Известно также, что вероятность такого крайне нежелательного явления, как ВЦП, выше при действии сжимающих нагрузок, т.е. это более характерно, например, для железобетонных колонн по сравнению с железобетонными плитами. При этом большинство исследований показывают [4, 5, 11, 13], что простое добавление в состав бетона такой неармирующей добавки, как полипропиленовая микрофибра определенных размеров, может немного понизить прочностные свойства бетона на сжатие. Но это незначительное понижение прочности несложно компенсировать за счет соответствующего уточнения рецептуры бетонной смеси [12], что позволяет сохранить соответствие полученного класса бетона с ППМФ заданному в проекте на данный объект требуемому классу бетона.

Другим способом предотвращения (или снижения вероятности) ВЦП и даже повышения огнестойкости железобетонных конструкций до требуемых пределов является использование

конструктивной огнезащиты, например, плитными материалами или штукатуркой [7, 8, 19]. Рассматривалась также возможность использования для этой цели вспучивающихся покрытий [20]. Однако нужно учитывать, что применение огнезащитных вспучивающих составов может быть ограничено проектными решениями или потребовать дополнительных испытаний на определение класса пожарной опасности строительных конструкций с нанесенным покрытием. Еще одной проблемой является относительно низкая стойкость и стабильность пенококса и, соответственно, эффективность таких покрытий при длительном огневом воздействии, характерном для железобетонных конструкций.

Следующим способом предотвращения взрывообразного разрушения бетона может являться использование стальной противоточной сетки для армирования поверхностного слоя бетонных конструкций, однако эффективность применения такого варианта для конкретных конструкций требует экспериментального подтверждения, а целесообразность, в том числе удобство монтажа, нуждается в технико-экономических обоснованиях.

В нашей стране в 90-х годах прошлого века и 00-х годах настоящего огневые испытания несущих конструкций из железобетона при воздействии нагрузок проводились в недостаточном количестве. Это связано со сложностью их подготовки и проведения и со значительной стоимостью. Еще нельзя не отметить несовершенство существующих нормативных документов [21, 22]. В частности, даже имеющиеся в ч. 9 и 10 ст. 87 Федерального Закона положения «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ, предусматривающие обязательное проведение таких экспериментов, далеко не всегда выполняются, а заменяются инженерными расчетами только на основании предлагаемых табличных и графических данных (СП 468.1325800.2019). Все это диктует необходимость проведения и тщательного анализа результатов огневых экспериментов для нагруженных железобетонных конструкций. И такой анализ должен проводиться с применением теплотехнических и статических расчетов. Однако в отличие от статических расчетов, теплотехническим до настоящего времени уделялось значительно меньшее внимание, что отражено, в частности, в СП 468.1325800.2019. В данном Своде правил в п. 6.5 указывается, что для упрощенного решения задач теплотехнического расчета даются приложения А и Б, а в них уже приведены рекомендованные кривые прогрева типовых сечений железобетонных конструкций в зависимости от различной длительности воздействия при стандартном температурном режиме пожара.

Все это свидетельствует о необходимости обоснованного выбора конкретных и эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения огнестойкости конструкций. Для решения этой задачи требуется проведение дополнительных огневых испытаний железобетонных конструкций как при наличии полипропиленовой микрофибры в составе бетона, так и при использовании конструктивной огнезащиты. Требуется также обеспечить проведение тщательного теплотехнического анализа результатов таких огневых экспериментов.

Материалы и методы

Статья посвящена анализу результатов уникальной серии огневых испытаний на огнестойкость, состоящей из семи огневых экспериментов образцов железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой. Испытания проводились по специальной программе в Испытательной лаборатории НИЦ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ. Описание применяемой методики проведения испытаний и используемого оборудования содержится в ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» и, применительно к особенностям испытания различных конструкций, — в ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции». Однако данные стандарты не предусматривают тщательного теплотехнического анализа результатов огневых испытаний, поэтому при проведении серии испытаний было запланировано и обеспечено проведение дополнительных термометрических измерений с последующим обобщением и использованием их результатов, что не предусматривается указаниями в стандартизованной методике.

Целью исследований являлась оценка эффективности технических решений, принимаемых для исключения или снижения вероятности взрывообразного разрушения бетона и повышения огнестойкости конструкций. Это необходимо для обоснованного выбора наиболее рациональных из таких решений. Логика организации этих экспериментов предусматривала анализ эффективности использования полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS» при сопоставлении результатов испытаний при ее наличии и отсутствии в матрице бетона. Кроме того, был предусмотрен анализ эффективности пассивной конструктивной огнезащиты, выполненной из плит «ПРОЗАСК Файерпанель», а также использование для целей огнезащиты штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ».

Различные огнезащитные штукатурки — это традиционное средство огнезащиты, и «ИГНИС ЛАЙТ» является ее типичным, хотя и модернизиро-

ванным представителем. В его состав, кроме цемента и вермикулита, входят не только дегидратирующие добавки на основе гидроксидов алюминия, но и целый набор химических компонентов и добавок для придания материалу прочности и пластичности (например, редиспергируемые полимерные порошки, различные эфиры и армирующая фибра).

Однако наибольший интерес представляет конструктивная огнезащита с применением плитных материалов «ПРОЗАСК Файерпанель». Как показала практика их применения для конструкций из различных материалов на многочисленных строительных объектах, они обладают достаточно высокой огнезащитной эффективностью, эксплуатационной стойкостью, технологичностью монтажа, эстетической привлекательностью и прочими положительными качествами. С учетом нормативных требований, предписывающих проведение огневых испытаний для конструкций из различных материалов под нагрузкой (как с огнезащитой, так и без нее), в случае применения плит «ПРОЗАСК Файерпанель» такие испытания проводились и продолжают проводиться. Для основных видов защищаемых конструкций разработаны и используются специальные элементы или каркасы для крепления плит, например, из легких стальных холодногнутых оцинкованных и/или окрашенных профилей. Именно с таким штатным крепежом должна подтверждаться работоспособность и эффективность подобной конструктивной огнезащиты.

Теоретические основы

Особенностью рассматриваемой серии огневых экспериментов является тщательный теплотехнический анализ их результатов. Теплотехнические расчеты в любом возможном объеме крайне желательны и востребованы. Они необходимы для правильной интерпретации результатов огневых испытаний, учитывая значительные затраты времени и средств на проведение даже ограниченного их количества и невозможность проведения таких испытаний для множества различных вариантов исполнения как самих конструкций, так и их огнезащиты. В то же время известные трудности с проведением такого анализа связаны со сложным поведением бетона и огнезащиты при высокотемпературном нагреве, отсутствием общепринятых методик и программ расчетов, а также с явно недостаточным объемом данных по теплофизическим и прочим характеристикам указанных материалов, в значительной степени зависящим от температуры.

Имеющиеся зарубежные программные комплексы (например, ANSYS) предполагают проведение как статических, так и теплотехнических расчетов, но мы предполагаем, что они доступны не каждому

конструктору из-за их высокой стоимости. Российский программный продукт «ЛИРА-САПР 2019» находится в стадии совершенствования для целей решения стационарных и нестационарных задач теплопроводности.

Однако оптимальным вариантом в нашей ситуации является использование одной из относительно несложных и производительных отечественных методик и программ теплотехнических расчетов. Для анализа результатов рассматриваемой серии испытаний привлекались апробированные методики и программы, которые ранее использовались при расчетах различных средств огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций на многочисленных объектах. Преимущества и особенности такого подхода продемонстрированы, в частности, в статье [23] на примере теплотехнических расчетов чугунных тубингов обделки тоннелей метрополитена. Используются компьютерные программы («Огнезащита. Версия ВУ.2» и «Огнезащита. Версия 2Т») [24] для расчетов в одномерной и двумерной постановке соответственно. Они разработаны в результате численного решения систем уравнений, включающих элементарное, т.е. без усложнений, уравнение теплопроводности с граничными условиями для описания нестационарного процесса теплопередачи для многослойной конструкции [23].

Результаты огневых испытаний железобетонных колонн и их обсуждение

Представлены и анализируются результаты серии огневых испытаний под нагрузкой, проведенных в ИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, образцов железобетонных колонн, изготовленных из тяжелого бетона класса В30 без фибры, а также из тяжелого бетона класса В30 с добавлением полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS». Колонны, изготовленные из бетона без добавления фибры, испытывались как без огнезащиты, так и с пассивной огнезащитой: или плитами «ПРОЗАСК Файерпанель», или огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ». Испытания проводились с целью определения предела огнестойкости образцов при воздействии по стандартному температурному режиму. Были изготовлены образцы колонн марки CL-40T4, имеющие размеры 400 × 400 × 3000 мм с продольным армированием профилем класса А-II Ø16 мм. Величина защитного слоя до продольной арматуры составляла 40 мм. Влажность бетона составила от 3 до 3,9 %.

Испытания проводились под воздействием постоянной статической вертикальной нагрузки, равной 981 кН (100 тс) при расчетной критической нагрузке в 150 тнс. Измеряли величину вертикальной деформации опытных образцов. Предельным состоянием при испытании на огнестойкость

является потеря несущей способности вследствие обрушения конструкции или возникновения предельной вертикальной деформации (составляет для данной конструкции 30 мм) либо скорости нарастания вертикальной деформации (более 10 мм/мин). Проведено пять огневых экспериментов, в каждом из которых испытывались по два опытных образца.

Три эксперимента проводились с колоннами без пассивной огнезащиты, «незащищенными»:

- в первом из них испытывались образцы из бетона без добавления ППМФ;
- в двух других испытывались образцы колонн с добавлением в бетон микрофибры «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³.

После изготовления образцов в них устанавливались термопары на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности путем засверливания бетона в центральной части граней колонны.

За время проведения эксперимента с колонной без ППМФ были зафиксированы следующие характерные особенности поведения образцов:

- практически с самого начала (с 3–4-й мин) начали фиксироваться многочисленные хлопки (звуки), свидетельствующие о ВПЦ бетона;
- после 15-й мин прервались показания термопар, размещенных по толщине бетона, предположительно, вследствие нарушения их целостности из-за отрыва фрагментов бетона, после чего нагрузка с опытных образцов была снята и эксперимент прекращен.

Интенсивность хрупкого разрушения бетона колонны с каждой минутой эксперимента возрастала, что характеризовалось усиливающимися звуками (хлопками), после чего нагрузка с опытных образцов была уменьшена на 80 %, при сохранении стандартного температурного режима в печи. При дальнейшем испытании колонны с незначительной нагрузкой в течение 10 мин взрывообразное разрушение бетона прекратило проявляться и эксперимент был прекращен.

При осмотре состояния образцов после испытаний (внешний вид показан на рис. 1) установлено разрушение защитного слоя бетона на глубину от 5 до 50 мм по всей поверхности образцов на всех гранях колонны. В отдельных местах защитный слой отсутствовал полностью с оголением арматуры.

За время проведения второго эксперимента для образцов с ППМФ зафиксировано только два хлопка, которые могли бы свидетельствовать о его хрупком разрушении. После 15-й мин эксперимент прекращен, чтобы обеспечить возможность сопоставления состояния образцов колонн при наличии и отсутствии в составе бетона ППМФ после одинакового времени огневого воздействия. При осмотре состояния образцов с добавлением ППМФ на одном из них зафиксиро-



Рис. 1. Опытный образец после первого огневого эксперимента (без ППФ в составе бетона)

Fig. 1. The test specimen after the 1st fire experiment (the concrete has no polypropylene microfiber)

вано два локальных участка частичного разрушения защитного слоя бетона на глубину не более 5 мм. Отмечено, что это локализовано в зонах нахождения печных форсунок и воздействия на образцы их пламени. Собственно, даже этот результат предполагает необходимость дальнейших исследований по поведению бетонов с добавлением ППМФ в случае воздействия на них не только стандартных, но и углеводородных пожаров и воздействия пламени реактивных форсунок.

Третий огневой эксперимент проведен также для образцов с ППМФ. В образцах были установлены термомпары на глубине 20, 30, 50 и 70 мм от нагреваемой поверхности. Кроме того, признано целесообразным изменение ориентации образцов для исключения лобового натекания пламени от форсунок на их поверхность (осуществлен их разворот на 45°). Первоначально планировалась продолжительность огневого воздействия 120 мин, но ввиду отсутствия признаков ВПЦ и наступления предельного состояния образцов, продолжительность эксперимента была увеличена до 151 мин. За это время не были зафиксированы характерные хлопки, предполагающие наличие взрывообразного (хрупкого) разрушения бетона. В ходе этого эксперимента постепенно росли вертикальные деформации



Рис. 2. Внешний вид опытного образца (с ППМФ в бетоне) после третьего огневого эксперимента

Fig. 2. The appearance of the test specimen (the concrete has polypropylene microfiber) after the 3rd fire experiment

ции со стабилизацией на уровне около 4 мм в период с 45 по 60-ю мин и постепенным уменьшением до 2,3 мм при окончании эксперимента. Зафиксировано появление влаги в виде водяных капель, поступающих в нижнюю часть огневой печи с опытного образца, начиная с 40–55-й мин. Подтверждено соответствие классификации R 150. При осмотре образцов после эксперимента (внешний вид показан на рис. 2) следов взрывообразного разрушения защитного слоя колонн не обнаружено. Продемонстрирована возможность обеспечения (со значительным запасом) предела огнестойкости колонн R 150 при добавлении в состав тяжелого бетона микрофибры «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³. Как показали результаты огневого эксперимента, не вызывает сомнений возможность обеспечения указанной огнестойкости и при больших нагрузках, превышающих задаваемый при испытаниях уровень в 981 кН (100 тс).

После этого проведено также два огневых эксперимента под нагрузкой для колонн из бетона класса В30 без ППФ, но с пассивной огнезащитой:

- в четвертом эксперименте испытывались образцы колонн с огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель»;

- в пятом эксперименте — образцы колонн с нанесенной огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ».

На опытные образцы для первого эксперимента производился монтаж однослойной конструктивной огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Монтаж проводился с использованием гвоздевых анкеров по бетону FISHER FNA II 6 × 30/30. Были дополнительно установлены термодатчики на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности колонны в ее центральной части. Длительность испытаний составила 241 мин без достижения образцами предельного состояния (максимальная вертикальная деформация 4,7 мм). Подтверждено соответствие огнестойкости такой защищенной колонны классификации R 240. К моменту окончания испытаний максимальная температура, зафиксированная термодатчиками, составила 627 °С (глубина 20 мм), 471 °С (30 мм), 243 °С (40 мм).

Осмотр опытных образцов после испытаний не зафиксировал существенных изменений их состояния, в частности, обрушений или отслоений огнезащитной облицовки и нарушения целостности защитного слоя бетона. Внешний вид образцов после испытаний показан на рис. 3а. Можно отметить только появление небольших трещин в огнезащитных плитах и образование щелей незначительного размера по торцам плит. Таким образом, продемонстрировано, что использование однослойной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм исключает ВПЦ защитного слоя колонн из тяжелого бетона и позволяет обеспечить высокий уровень предела огнестойкости (не менее 240 мин).

На опытные образцы для второго эксперимента наносилась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ», средняя толщина сухого слоя составила 26 мм. Были установлены термодатчики на поверхности колонны в ее центральной части и на глубине 25 мм от поверхности. Длительность испытаний составила 241 мин без достижения образцами предельного состояния (вертикальная деформация составила не более 2 мм). Подтверждено соответствие классификации R 240. К моменту окончания испытаний максимальная температура, зафиксированная термодатчиками, составила 400 °С на поверхности колонны и 276 °С на глубине 25 мм. Осмотр образцов после испытаний не зафиксировал существенных изменений их состояния, в частности, обрушений или отслоений огнезащитного покрытия и нарушений целостности защитного слоя бетона. Таким образом продемонстрировано, что использование огнезащиты «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 26 мм исключает ВПЦ для колонн из бетона класса В30 и обеспечивает высокий уровень предела огнестойкости (не менее 240 мин).



Рис. 3. Внешний вид образцов с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» (а) и штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ» (б) после испытаний

Fig. 3. The post-testing appearance of the fireproof specimens protected with PROZASK FIREPANEL plates (a) and IGNIS LIGHT plaster (b)

Анализ результатов серии из упомянутых пяти огневых экспериментов показал, что при испытаниях образцов из тяжелого бетона класса В30 без добавления ППМФ при заданной нагрузке происходило взрывообразное разрушение бетона с разрушением его поверхностного слоя на глубину от 5 до 50 мм всего за 15 мин огневого воздействия. Несмотря на то, что влажность испытываемой конструкции была более 3 %, после снятия нагрузки с колонны в ходе эксперимента прекратилось хрупкое разрушение бетона. Это объясняется первостепенным влиянием интенсивности напряжений в конструкции из тяжелого бетона на возможность и развитие хрупкого разрушения, и в меньшей степени — влиянием высокой естественной влажности бетона. Следующими экспериментами наглядно показано, что добавление в бетон класса В30 специально подобранной ППМФ «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³ (вместо рекомендованных в Еврокодах 2 кг/м³) позволило исключить это явление. Сопоставление показаний термодатчиков, установленных на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности, показало, что уровень прогрева образцов при наличии микрофибры и без ВПЦ был приблизительно в полтора раза ниже, чем у образцов без микрофибры.

В нормативных документах указано, что огневые испытания при воздействии проектных нагрузок могут являться основанием для подготовки заключений по огнестойкости аналогичных железобетонных колонн, подобных испытанным. То есть допускается

обоснованный перенос результатов таких испытаний на другие конструкции и условия, однако для этого должны привлекаться апробированные методики расчетов, в частности, теплотехнических.

Применительно к железобетонным колоннам в качестве таковой может применяться методика и программа численных расчетов температурных полей в двумерной постановке «Огнезащита. Версия 2Т», используемая в [24]. На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов для колонны размером 400×400 мм при стандартном режиме огневого воздействия продолжительностью 150 мин при использовании эффективных теплофизических характеристик для тяжелого бетона, заимствованных из авторитетного источника [25]. Кривые на рис. 4 и 5 демонстрируют уровень неравномерности прогрева рассматриваемой несущей конструкции, и это необходимо учитывать в ходе анализа результатов огневых испытаний и при оценке огнестойкости железобетонных колонн.

Такая неравномерность (особенно в начальный период огневого воздействия) обусловлена влиянием влаги на процессы теплопереноса в бетоне, и это упрощенно учитывается использованием эффективных теплофизических характеристик (ТФХ)

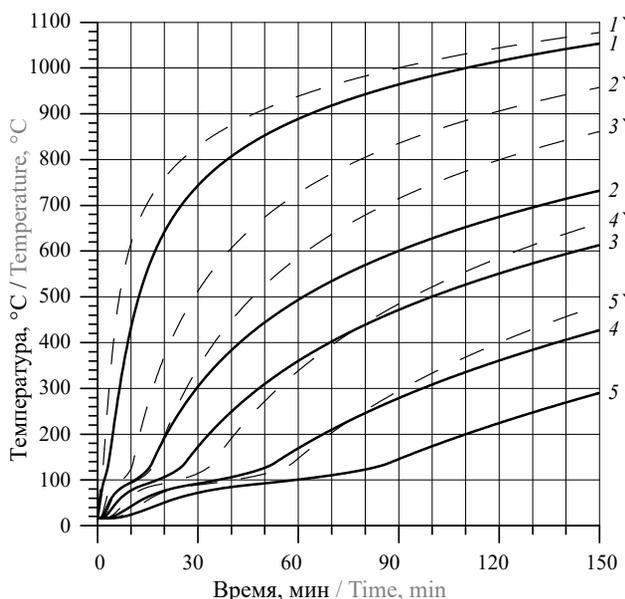


Рис. 4. Зависимости от времени температуры в контрольных точках железобетонной колонны, расположенных на расстоянии от ее поверхности: 0 мм (1, 1'); 20 мм (2, 2'); 30 мм (3, 3'); 50 мм (4, 4'); 70 мм (5, 5') по сечению, перпендикулярному грани колонны (—, 1–5), и по сечению, расположенному к нему под углом 45° (----, 1'–5')

Fig. 4. The time dependence of temperature at the control points of a reinforced concrete column, located at a distance from the surface: 0 mm (1, 1'); 20 mm (2, 2'); 30 mm (3, 3'); 50 mm (4, 4'); 70 mm (5, 5'), along the section perpendicular to the column facet (—, 1–5) and along the section, located at the angle of 45° (----, 1'–5')

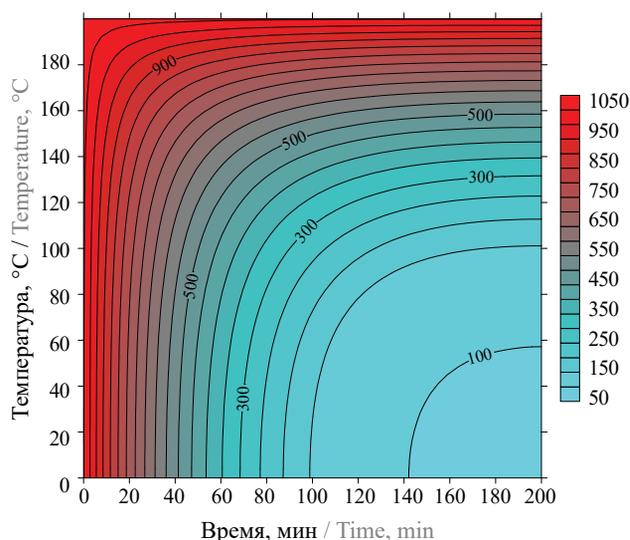


Рис. 5. Температурное поле в железобетонной колонне размером 400×400 мм в момент времени 150 мин

Fig. 5. The temperature in a reinforced concrete column, 400×400 mm at time 150 min

[25]. Проявляется это влияние в виде более низкого уровня температуры (см. рис. 4) по сравнению с вариантами, когда влага должным образом не учитывается, что характерно, например, для температурных кривых, приведенных в СП 468.1325800.2019.

В ходе третьего эксперимента фиксировалось изменение температуры с помощью термопар, установленных на глубине 20, 30, 50 и 70 мм от поверхности колонны в ее центральной части. Получены следующие значения максимальной температуры к моменту окончания огневого воздействия: 300°C (на глубине 20 мм), 165°C (30 мм), 150°C (50 мм), 131°C (70 мм). Сопоставление этих данных с расчетными, представленными на рис. 4, показали значительно меньший уровень экспериментальных температур. Но это не свидетельствует о нецелесообразности использования подобных расчетных данных, поскольку они не противоречат результатам, представленным, например, в СП 468.1325800.2019 и полученным при указанных там значениях ТФХ железобетона (в особенности, при значительной длительности огневого воздействия). Более того, результаты, приведенные на рис. 4, получены при использовании эффективных ТФХ тяжелого бетона [25], учитывающих влияние на них влаги. Предложенный там способ учета такого влияния сказался на характере изменения расчетных кривых (см. рис. 4). Анализ полученной экспериментальной информации подтверждает сложность механизма теплопереноса в железобетонных конструкциях. Результаты измерения температуры с помощью термопар свидетельствуют, что даже использование таких эффективных ТФХ бетона не позволяет учитывать в полной мере все реали-

зуемые процессы, в частности массоперенос влаги в бетоне.

В целом результаты проведенных испытаний при нагрузке колонн из тяжелого бетона с добавлением в него ППФ демонстрируют принципиальную возможность обеспечения высоких пределов огнестойкости (не менее R 120 и R 150) даже без наличия огнезащиты. Это подтверждает и дополняет результаты, полученные ранее, когда аналогичные огневые испытания во ВНИИПО МЧС России подтвердили возможность достижения огнестойкости REI 180 железобетонными плитами с добавлением в них этой же фибры, при этом взрывообразное разрушение бетона не выявлено. Кроме того, полученные в ходе испытаний данные свидетельствуют, что физическая влага внутри бетона приводит к снижению уровня нагрева конструкции.

Анализ результатов огневых экспериментов при использовании конструктивной огнезащиты показал, что исключить взрывообразное разрушение защитного слоя колонн из тяжелого бетона без ППМФ и обеспечить высокий уровень их предела огнестойкости удалось при использовании и однослойной конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм (не менее 180 мин), и при использовании огнезащитной штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 26 мм (не менее 240 мин).

Результаты, полученные при испытаниях в огневых печах нагруженных колонн, могут являться основой для анализа и последующей подготовки заключений по огнестойкости для других подобных конструкций и при другой продолжительности огневого воздействия на них. Для этого в качестве примера воспользуемся представленными на рис. 6 результатами измерений температуры в эксперименте. Они получены с помощью термопар, установленных дополнительно требованию ГОСТ 30247.1–94 на поверхности колонн (в данном случае под огнезащитной штукатуркой), а также на глубине 25 мм от ее поверхности (кривые 2 и 3 на рис. 6).

В ходе анализа использовалась методика и программа численных расчетов температурных полей в одномерной постановке «Огнезащита. Версия ВУ.2», используемая в [23]. Моделируется одномерная теплопередача в многослойной конструкции из «якобы неразлагающихся» материалов с эффективными ТФХ. «Обнуляется» целый ряд параметров, предусмотренных в программе и позволяющих учитывать физико-химические процессы и процессы массопереноса в материалах при нагреве. Учитывается только изменение от температуры эффективных теплофизических характеристик материалов каждого слоя конструкции.

Проведено прогнозирование изменения температуры в железобетонной колонне на различной глубине от ее поверхности. При расчетах задавалось граничное условие 1-го рода в виде изменения от времени температуры на границе «огнезащита — образец», т.е. под огнезащитной штукатуркой толщиной 26 мм (кривая 2 на рис. 6). Как и ранее, использовались ТФХ тяжелого бетона, заимствованные в [25].

Можно отметить, что влага содержится не только в бетоне, но и в огнезащитке, основой которой является цемент и вспученный вермикулит с другими дегидратирующими добавками. В данном случае это штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ»; и вид кривой 2 свидетельствует о влиянии влаги на характер нагрева защищаемой конструкции. Наличие результатов термодатных измерений на границе «огнезащита-конструкция» в подобных случаях освобождает от необходимости непосредственного учета такого влияния и позволяет использовать при расчетах граничное условие 1-го рода.

Предварительно была определена расчетная зависимость изменения от времени температуры для глубины 25 мм, т.е. для глубины установки термопары в образцах. Сопоставление показало хорошее совпадение расчетной и экспериментальной кривых, что подтвердило возможность прогнозирования уровня прогрева колонны с подобной огне-

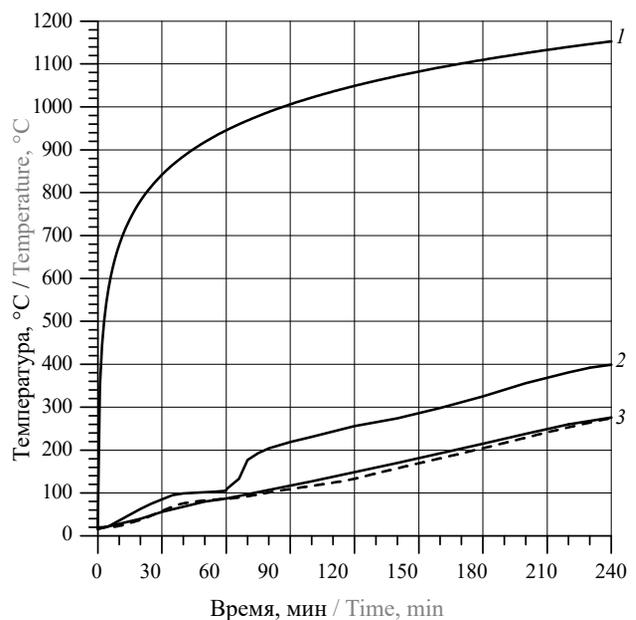


Рис. 6. Режим стандартного пожара (1) и результаты измерения температуры термопарами, расположенными на поверхности колонны под огнезащитной штукатуркой толщиной 26 мм (2) и на глубине 25 мм от поверхности (3); — — — — — расчет для глубины 25 мм

Fig. 6. A standard fire curve (1) and temperature measurements taken by the thermal couples on the surface of the column below the 26-mm layer of the fireproofing plaster (2) and 25 mm below the surface (3); — — — — — the calculation made for 25 mm below the surface

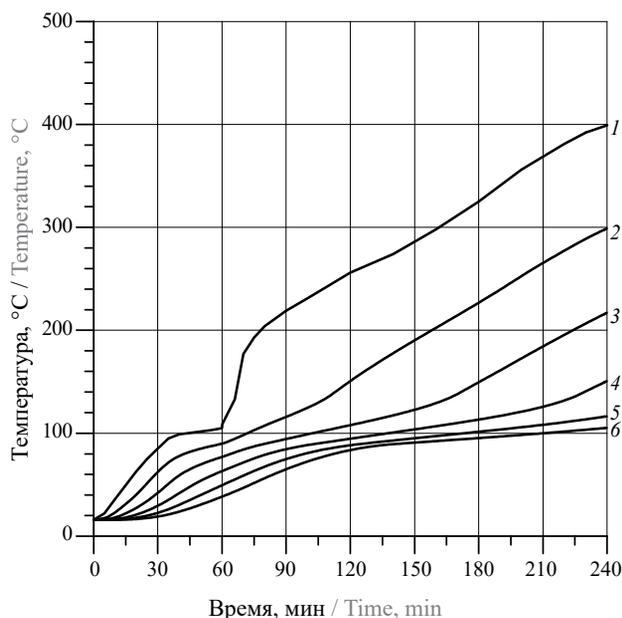


Рис. 7. Зависимости от времени температуры в контрольных точках в центральной зоне железобетонной колонны, расположенных на ее поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 40 мм (3); 60 мм (4); 80 мм (5); 100 мм (6) при толщине огнезащитной штукатурки 26 мм

Fig. 7. The time dependence of temperature at the control points in the central zone of a reinforced concrete column, located on its surface (1), and at a distance from the heated surface: 20 mm (2); 40 mm (3); 60 mm (4); 80 mm (5); 100 mm (6) under 26 mm of plaster

защитой, т.е. возможность переноса (пересчета) полученных результатов на другие подобные конструкции. В ходе такого моделирования были получены зависимости, представленные на рис. 7, для участков железобетонной колонны, расположенных на различном расстоянии от обогреваемой поверхности. Расчеты в одномерной постановке в данном случае позволили более оперативно и в большем объеме (по сравнению с двумерными расчетами) проводить такое моделирование. Однако вполне реально проводить расчеты и в двумерной постановке при использовании граничного условия 1-го рода по всей поверхности колонны. Также следует отметить, что такое хорошее совпадение расчетной и экспериментальной кривых явилось результатом того, что огнезащитное покрытие в ходе испытаний не разрушалось под воздействием деформируемой защищаемой конструкции и не растрескивалось. Возможно предположить, что расчетные теплотехнические данные, полученные с другим огнезащитным составом при испытаниях на колоннах без нагрузки, не дали бы такой сходимости, если бы другой огнезащитный состав при малейшей деформации защищаемой конструкции начал бы разрушаться и оголять железобетонную колонну. Данный тезис подтверждает ранее высказанную необходимость в проведении огневых испытаний любых конструк-

ций (как с огнезащитой, так и без) именно при проектных нагрузках.

Подобным образом проводился теплотехнический анализ теплового состояния железобетонных колонн со смонтированными огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. В данном случае не проводились измерения температуры на поверхности колонны (дополнительные термопары устанавливались только по ее глубине). Расчет был проведен в двумерной постановке при использовании следующих ТФХ плит «ПРОЗАСК Файерпанель»: коэффициент теплопроводности — 0,391 Вт/(м·К), удельная теплоемкость — 1444 Дж/(м³·К), плотность — 1100 кг/м³. Его результаты представлены на рис. 8.

Сравнение кривых, приведенных на рис. 4 и 8, демонстрирует, насколько снижается уровень нагрева колонны при использовании плит в качестве огнезащиты. Сопоставление результатов расчетов с данными измерения температур термопарами, установленными на различном расстоянии от поверхности, показало, что, наряду с аналогичным характером изменения во времени температур в ходе огневых испытаний колонны с огнезащитой, их уро-

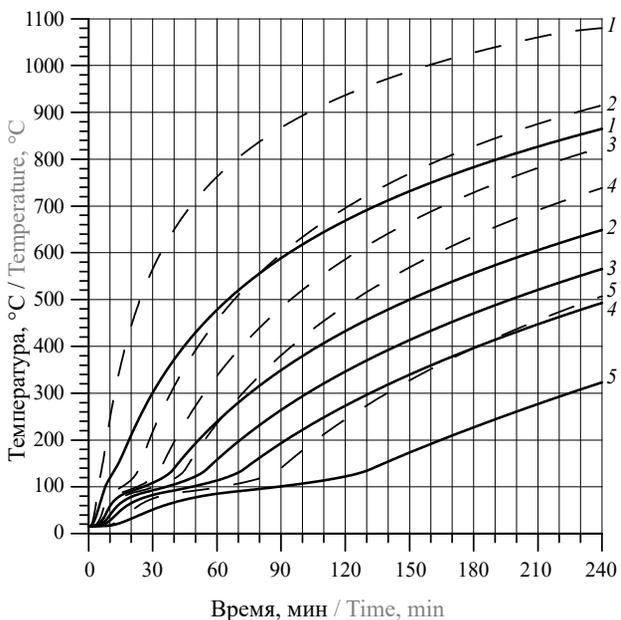


Рис. 8. Зависимости от времени температуры в железобетонной колонне с огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм в контрольных точках, расположенных на расстоянии от ее поверхности: 0 мм (1, 1'); 20 мм (2, 2'); 30 мм (3, 3'); 40 мм (4, 4'); 70 мм (5, 5') по сечению, перпендикулярному грани колонны (—, 1–5), и по сечению, расположенному к нему под углом 45° (----, 1'–5')

Fig. 8. The time dependence of temperature in a reinforced concrete column, having PROZASK Firepanel plates that are 12.5 mm thick, checked at the control points, located at the following distance from its surface: 0 mm (1, 1'); 20 mm (2, 2'); 30 mm (3, 3'); 40 mm (4, 4'); 70 mm (5, 5') along the section perpendicular to the column facet (—, 1–5) and along the section located at the angle of 45° (----, 1'–5')

вень оказался ниже, чем представленный на рис. 8. Это является дополнительным свидетельством более значимого влияния влаги на теплопередачу в железобетонной колонне при огневом воздействии, чем то, что прогнозируется при расчетах с эффективными ТФХ бетона, упрощенно учитывающими такое влияние. Таким образом, можно отметить, что подобные расчеты дают результаты с определенным запасом, что вполне допустимо для практики.

Результаты огневых испытаний железобетонных плит перекрытий и их обсуждение

Наряду с огневыми испытаниями колонн, организована и проведена серия огневых экспериментов в ИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ опытных образцов железобетонных плит перекрытий под действием постоянной статической вертикальной нагрузки 40 кН. Плиты типа 2П30.18–30 размерами 3000 × 1750 × 170 мм, изготовленные по чертежам ИЖ 920 из тяжелого бетона класса В25, в состав которого полипропиленовая фибра не входила. Опытные образцы подвергались одностороннему тепловому воздействию по стандартному температурному режиму. Регистрировалась величина прогиба и температура необогреваемой поверхности плит. В качестве предельного состояния рассматривалась потеря несущей способности конструкции вследствие ее обрушения или возникновения предельных деформаций (предельный прогиб в середине пролета 140 мм, скорость нарастания деформации более 0,51 см/мин).

В ходе испытаний образцов плит фиксировались отдельные характерные хлопки, свидетельствующие о взрывообразном разрушении бетона (с 17-й минуты от начала огневого воздействия с наибольшей интенсивностью приблизительно на 25-й минуте и прекращением хлопков после 35-й минуты). Зафиксировано также увеличение скорости нарастания деформации (достигла 0,5 см/мин) и обрушение опытных образцов плиты на 52–54-й минуте. Осмотр образцов после эксперимента показал, что в центральной зоне плиты имеется обширный участок, на котором отсутствует поверхностный слой бетона (утонение плиты приблизительно на 7 мм). Предел огнестойкости опытных образцов железобетонной плиты был достигнут на 52 и 54-й мин испытания вследствие потери несущей способности конструкции. Таким образом, предел огнестойкости плит, испытанных под воздействием статической нагрузки, равной 40 кН, составляет 53 мин, что соответствует классификации REI 45. Перед началом испытаний внутри плиты монтировались термодатчики на глубине 30 мм от плоскости обогреваемой поверхности, что соответствовало глубине залегания нижнего ряда арматурного

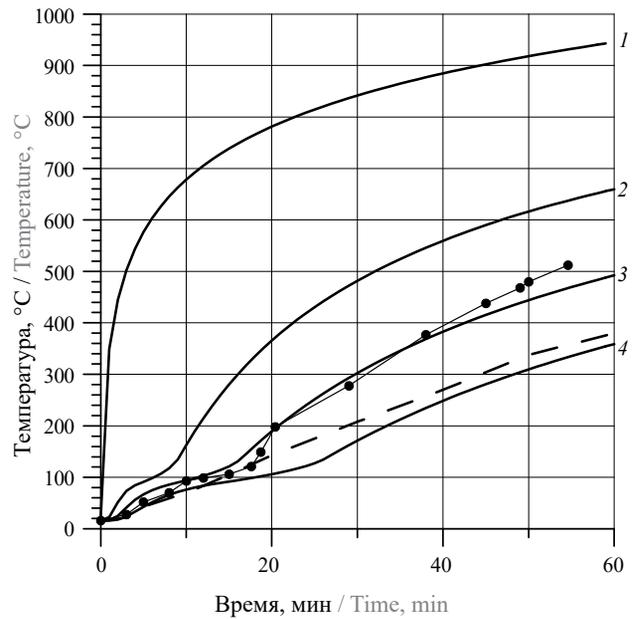


Рис. 9. Режим стандартного пожара (1) и результаты расчетов изменения от времени температуры на глубине от нагреваемой поверхности 10 мм (2), 20 мм (3), 30 мм (4) для испытываемой под нагрузкой железобетонной плиты толщиной 140 мм (без фибры и без огнезащиты); — — — — — рекомендации СП468 для глубины 30 мм от нагреваемой поверхности плиты; —●—●— результаты регистрации температуры при испытании плиты на глубине 30 мм от ее поверхности

Fig. 9. A standard fire curve (1) and calculation results for a temperature change depending on how deep it is from the heated surface: 10 mm (2), 20 mm (3), 30 mm (4) for a 140 mm-thick reinforced concrete slab (that has neither polypropylene microfiber nor fire proofing); — — — — — SP468 recommendations for the 30 mm depth; —●—●— temperature measurements taken in the course of the plate testing at the depth of 30 mm from the surface

каркаса. Результаты регистрации изменения от времени температуры на этой глубине представлены на рис. 9.

В ходе анализа проведена серия теплотехнических расчетов при использовании ТФХ тяжелого бетона [25]. Сравнение характера изменения экспериментальной и расчетных кривых однозначно свидетельствует, что зафиксированный рост градиента и уровня температуры (начиная с 17-й мин) может быть объяснен уменьшением толщины защитного слоя вследствие зафиксированного в эксперименте взрывообразного разрушения бетона. Для подтверждения этого на графике приведены расчетные кривые не только для глубины 30 мм от поверхности, но и для глубины 20 и 10 мм (кривая 3 и 2 на рис. 9). Видно, что экспериментальная кривая, которая вначале практически совпадает с расчетной кривой для глубины 30 мм, в дальнейшем резко приближается и на 20-й мин достигает уровня кривой 3 для глубины 20 мм, а после этого превышает и ее уровень. Но именно с 17-й мин в эксперименте зафиксировано начало взрывообразного разрушения

бетона. Кривая 3, по существу, демонстрирует, какой была бы температура в зоне расположения термопары в случае уменьшения слоя бетона над ней на 10 мм, т.е. с 30 до 20 мм.

На рис. 9 приведена также расчетная кривая, заимствованная из графиков, рекомендованных в СП 468.1325800.2019 для оценки уровня прогрева конструкций из тяжелого бетона на силикатном заполнителе (для глубины 30 мм от поверхности). Наши расчеты прогрева плиты на указанной глубине показали несколько иной характер изменения температурной кривой по сравнению с рекомендованной СП 468, но значения температуры в обоих случаях достаточно близки. Все это косвенно подтверждает, что при зафиксированном в эксперименте уровне уменьшения толщины образца вследствие ВПЦ должно произойти существенное увеличение уровня прогрева железобетонной плиты, что и было зафиксировано в ходе эксперимента. Как отмечалось, предотвратить это нежелательное явление или значительно снизить вероятность его наступления (проявления) возможно за счет введение в бетонную смесь полипропиленовой фибры, а также использования огнезащиты.

В рамках рассматриваемой серии огневых экспериментов проведено также два огневых эксперимента с образцами плит перекрытий из тяжелого бетона класса В25 без ППФ, имеющих размеры $3000 \times 1750 \times 170$ мм и изготовленных по чертежам ИЖ 920. В первом из них использовалась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ», а во втором — огнезащита плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

На опытные образцы для первого эксперимента наносилась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 25 мм. За время проведения испытаний образцов уровень деформаций был значительно меньше предельных. Отмечено медленное нарастание прогиба от 9,15 на 121-й мин, после которой испытания были остановлены. Максимальная температура, зафиксированная термопарами на 121-й минуте на поверхности образцов плиты (под огнезащитой), составила $355\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 20 мм от поверхности плиты — $330\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на необогреваемой поверхности плиты — $78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Признаки взрывообразного разрушения защитного слоя бетона (в виде хлопков) не фиксировались. Таким образом, предел огнестойкости плит с огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 25 мм, испытанных под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 600 кгс, составил не менее 121 мин, что соответствует классификации REI 120.

Были проведены теплотехнические расчеты, которые показали, что температура на необогреваемой поверхности к моменту окончания огневого воздействия составила $76\text{ }^{\circ}\text{C}$, что совпадает с результатами

термопарных измерений. Расчетное значение температуры на глубине 20 мм от поверхности плиты в данном случае оказались ниже указанного уровня ($330\text{ }^{\circ}\text{C}$), что может быть объяснено погрешностями при измерениях. В ходе расчетов использовалось значение коэффициента теплопроводности огнезащитной штукатурки, равное $0,137\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (определено по ГОСТ 7076–99), а также значения плотности $500\text{ кг}/\text{м}^3$ и удельной теплоемкости $840\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Но особенно перспективным, как и в случае с колоннами, представляется использование конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». На опытные образцы для второго эксперимента производился монтаж однослойной конструктивной огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Монтаж проводился с использованием гвоздевых анкеров по бетону FISHER FNA II $6 \times 30/30$.

За время проведения испытаний зафиксировано медленное нарастание прогиба до 91-й мин с увеличением скорости нарастания деформации до $0,6\text{ мм}/\text{мин}$ с 92 до 121-й мин, после которой испытания были остановлены. Температуры, зафиксированные термопарами на глубине 25 мм от поверхности плит, составили 240 и $292\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 121-й мин, а максимальная температура на необогреваемой поверхности плиты — $68\text{ }^{\circ}\text{C}$. Признаки взрывообразного разрушения защитного слоя бетона не фиксировались. Таким образом, предел огнестойкости исследуемых плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм, испытанных под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 600 кгс, составил не менее 121 мин, что соответствует классификации REI 120. Доказано, что применение такой огнезащиты (как и рассмотренное ранее применение огнезащитной штукатурки) исключает взрывообразное разрушение бетона и обеспечивает указанный предел огнестойкости со значительным запасом.

Были проведены теплотехнические расчеты, которые показали, что температура на необогреваемой поверхности к моменту окончания огневого воздействия составила $74\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на глубине 25 мм — $291\text{ }^{\circ}\text{C}$, что согласуется с результатами термопарных измерений.

Один из огневых экспериментов в рассматриваемой уникальной серии проводился без огнезащиты и без нагрузки, но при огневом воздействии по углеводородному режиму согласно ГОСТ Р ЕН 1363.2–2014. Испытывались образцы железобетонных плит перекрытия типа 2П30.18–30, изготовленные по чертежам серии ИЖ 920 из тяжелого бетона класса В25 с добавлением в бетонную смесь полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS». В опытных образцах устанавливались термопары на глубине 30 и 50 мм.

На момент окончания огневого воздействия средняя температура на глубине 30 мм от обогреваемой поверхности опытного образца составила 312 и 108 °С на глубине 50 мм. За время проведения испытаний хрупкого (взрывообразного) разрушения бетона зафиксировано не было. Этот эксперимент подтвердил эффективность использования ППФ, позволившего исключить взрывообразное разрушение бетона в условиях большего уровня и более динамичного нагрева железобетонной конструкции, что отличает огневое воздействие по углеводородному режиму по сравнению со стандартным.

Проведенный теплотехнический анализ не ограничился рассмотрением результатов перечисленных огневых экспериментов. В ходе его проведения анализировались также другие заслуживающие внимания результаты, полученные авторами ранее. В частности, был проведен детальный анализ двух огневых испытаний нагруженных железобетонных плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» при стандартном температурном режиме. Испытывались образцы плит типа ПАТ-14А800.1-1 с габаритными размерами 6000 × 2000 × 140 мм. Плиты изготовлены из бетона марки В30 при толщине защитного слоя бетона 30 мм. Использовалась огнезащитная облицовка двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной по 12,5 мм.

В ходе первого эксперимента, продолжительность которого составила 91 мин, а статическая нагрузка — 24,53 кН (2500 кгс), регистрировалась температура на необогреваемой поверхности образцов и на границе железобетонная плита — огнезащита, т.е. под двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Из-за столь раннего завершения первого испытания указано, что предел огнестойкости исследуемого образца составляет не менее 91 мин, что соответствует классификации REI 90, хотя на этот момент температура на необогреваемой поверхности конструкции и величина прогиба были очень низкими, далекими до критических.

В ходе второго эксперимента при действии такой же статической нагрузки на момент его окончания (185 мин) температура на необогреваемой поверхности железобетонной плиты составляла всего около 60 °С. Более важными оказались данные по ее прогибу, который составил 259 мм при значении предельно допустимого прогиба — 285 мм. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая конструктивная огнезащита испытывалась в максимально жестких условиях (при деформациях, близких к предельным). Предел огнестойкости исследуемого образца составил не менее 185 мин, что соответствует классификации REI 180.

В ходе этого эксперимента проводились дополнительные измерения температуры на границе

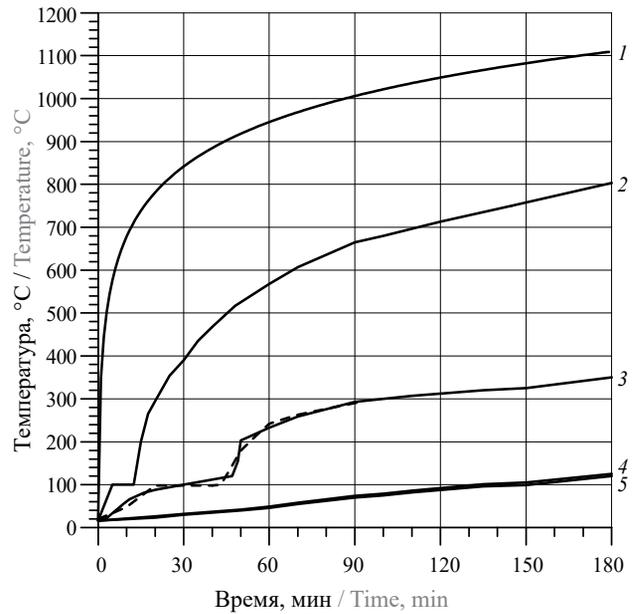


Рис. 10. Режим стандартного пожара (1) и результаты измерения температуры во втором эксперименте: между первой и второй огнезащитной плитой (2); между огнезащитой и железобетонной плитой (3); в железобетонной плите на глубине 50 мм (4) и 80 мм (5); — — — — — между огнезащитой и плитой в первом эксперименте

Fig. 10. A standard fire curve (1) and temperature measurements taken during the 2nd test between the first and second fireproofing plate (2), between the fireproofing and the reinforced concrete slab (3), in a reinforced concrete slab at the depth of 50 mm (4) and 80 mm (5), — — — — — between the fire proofing and the plate during the 1st test

«железобетонная плита — огнезащита», а также между слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Регистрировалась также температура в контрольных точках железобетонной плиты, расположенных на расстоянии 50 и 80 мм от ее поверхности. Результаты измерений представлены на рис. 10. На этом рисунке показаны также результаты измерений температуры на границе «железобетонная плита — огнезащита» в первом эксперименте, прекращенном на 91-й минуте. Как видно до этого момента времени результаты измерений в обоих случаях близко совпадают. Измерения отразили влияние влаги, содержащейся в огнезащитных плитах, поскольку их основой является легкий цемент и специальные наполнители.

Анализ результатов таких достаточно дорогих экспериментов позволил получить важную для практики информацию, которая может использоваться для прогнозирования ситуации для других случаев работы конструкций, отличающихся от реализованных при испытаниях, в частности, продолжительностью огневого воздействия, а также другими важными параметрами (прежде всего толщинами огнезащиты).

Не вызывает сомнений возможность использования данных по измерению температуры на границе «огнезащита — образец» под двумя слоями

огнезащитных плит общей толщиной 25 мм. С их помощью проведено прогнозирование изменения температуры в железобетонной плите на различной глубине от ее поверхности. Использовалась упоминаемая ранее методика и программа расчетов температурных полей в конструкциях в одномерной постановке. В ходе теплотехнических расчетов задавалось граничное условие 1-го рода в виде зарегистрированного в эксперименте изменения во времени температуры на границе «огнезащита – образец», т.е. под двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» (см. рис. 10). В ходе расчетов были получены температурные кривые для сечений железобетонной плиты, расположенных на различном расстоянии от ее поверхности (рис. 11).

Проведено сопоставление температурных зависимостей, полученных расчетным путем и зафиксированных термопарами во втором эксперименте на глубине 50 и 80 мм от обогреваемой поверхности железобетонной плиты (см. рис. 10). Сопоставление этих измерений с расчетными кривыми показало, что для контрольной точки, располагающейся на расстоянии 80 мм от нагреваемой поверхности железобетонной плиты, наблюдается близкое соответствие «расчет — эксперимент», а для контрольной точки, на расстоянии 50 мм, расчетная кривая располагается

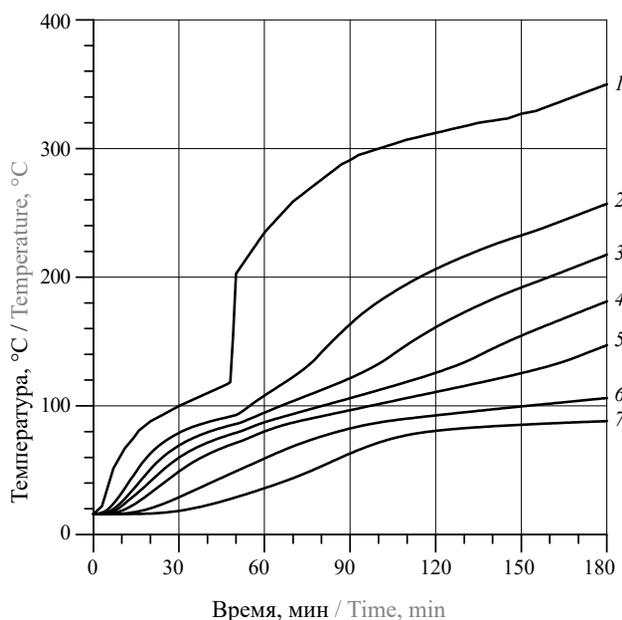


Рис. 11. Зависимости от времени температуры в сечениях железобетонной плиты, расположенных на обогреваемой поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 30 мм (3); 40 мм (4); 50 мм (5); 80 мм (6), а также 140 мм (7), т.е. на ее необогреваемой поверхности (толщина огнезащиты 25 мм)

Fig. 11. Time dependencies of temperature in the concrete slab cross-sections, located on the heated surface (1), and at a distance from the heated surface, equal to 20 mm (2); 30 mm (3); 40 mm (4); 50 mm (5); 80 mm (6), and also 140 mm (7), that is, on its unheated surface (the thickness of the fireproofing is 25 mm)

приблизительно на 20 градусов выше экспериментальной. Полученное соответствие можно признать удовлетворительным. Тем более что отличие значений экспериментальных температур должно составлять не менее 20 градусов с учетом различия глубин расположения термопар. В любом случае можно констатировать, что полученные расчетные значения температур не ниже экспериментальных. Это свидетельствует, что результаты, представленные на рис. 11, можно использовать для прогнозирования уровня прогрева железобетонных конструкций при использовании огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» суммарной толщиной 25 мм, что необходимо для оценки пределов огнестойкости таких конструкций. Получено, в частности, что на расстоянии 30 мм от поверхности плиты температура составила порядка 220 °C при времени огневого воздействия 180 мин. Это свидетельствует об избыточности указанной толщины огнезащиты (25 мм) для обеспечения пределов огнестойкости конструкции до REI 180.

Рассмотрена также возможность прогнозирования с помощью расчетов уровня прогрева железобетонных плит при других (меньших) толщинах огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Используя представленный выше подход, реализованный для опытного образца с двумя слоями огнезащитных плит общей толщиной 25 мм, можно было бы таким же образом провести огневые эксперименты и провести подобный теплотехнический анализ для образцов с однослойной огнезащитой плитой толщиной 12,5 или 8 мм. Поскольку такие испытания хоть и готовятся, но результаты еще отсутствуют, попытаемся воспользоваться имеющимися результатами измерения температуры между огнезащитными плитами во втором из рассматриваемых экспериментов (кривая 2 на рис. 10).

Анализ этих результатов показал, что наблюдается (хоть и менее продолжительная, чем для кривой 3) «полка» при температуре порядка 100 °C, что объясняется характерными процессами, происходящими при нагреве во влагосодержащем огнезащитном материале, к числу которых относятся и плиты «ПРОЗАСК Файерпанель». После «полки» на кривой 2 продолжительностью около 8 мин с 14-й мин резко возрастает градиент изменения температуры. Затем он начинает постепенно уменьшаться и далее характер изменения температуры приблизительно «отслеживает» характер изменения температуры в печи по стандартному режиму с постепенным, а не резким сближением обеих кривых. Это свидетельствует, что отсутствует существенное нарушение сплошности огнезащитной облицовки при высокотемпературном нагреве (во всяком случае, в зоне размещения термопары).

Проведено сопоставление ТФХ тяжелого бетона и предполагаемых характеристик огнезащитных плит. Для этого проведена еще одна серия расчетов, которые строились по следующему принципу. Моделировался стандартный режим нагрева на рассматриваемую железобетонную плиту с огнезащитой. Оценивалось, каковым будет отличие в уровне температуры под слоем огнезащиты толщиной 12,5 мм в случае, если под ним окажется не следующий слой огнезащитной плиты, а бетон. Оценки показали, что при замене огнезащиты бетоном температура под ней оказалась существенно ниже, чем при наличии нижележащего слоя огнезащиты. Это объясняется отличием их характеристик, а именно значительно большим уровнем коэффициента теплопроводности (а также температуропроводности) тяжелого бетона по сравнению с огнезащитой, основой которой является легкий (и менее теплопроводный) бетон с наполнителями.

Это свидетельствует о том, что до получения новых результатов огневых экспериментов для образцов с относительно небольшими толщинами огнезащиты, для предварительного анализа можно воспользоваться результатами термодинамических измерений на границах между первой и второй огнезащитными плитами с целью оценки уровня прогрева железобетонной плиты при толщинах огнезащиты менее 25 мм. При этом уровень прогрева этой железобетонной плиты будет определяться с некоторым завышением, т.е. будет проводиться «оценка сверху», что вполне приемлемо (до получения новых экспериментальных результатов) для решения практических задач.

С учетом данного допущения проведены расчеты температурных полей в железобетонной плите с огнезащитой из одной плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Расчеты проводились аналогичным путем, с использованием граничного условия 1-го рода, в качестве которого принимались результаты измерения во времени температуры на границе между первой и второй огнезащитными плитами (кривая 2 на рис. 10). В ходе моделирования были получены температурные кривые, представленные на рис. 12.

Расчетные оценки показали, что при толщине огнезащиты 12,5 мм температура на нагреваемой поверхности железобетонной плиты составляет 102 °С, что значительно ниже критической температуры для ограждающей конструкции. Установлено также, что температура 500 °С достигается на расстоянии 20 мм от нагреваемой поверхности плиты за 131 мин, а на глубине 30 мм — за 184 мин. Как известно, плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» изготавливаются толщиной не только 12,5 мм, но и 8 мм. С помощью полученных результатов расчетов можно оценивать время достижения различных температур при разных толщинах плит огнезащиты. Для этого следует проводить интерполя-

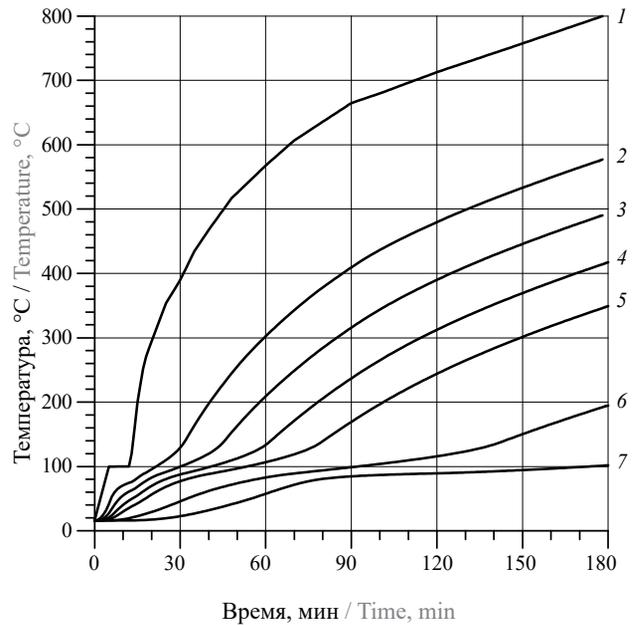


Рис. 12. Зависимости от времени температуры в сечениях железобетонной плиты, расположенных на обогреваемой поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 30 мм (3); 40 мм (4); 50 мм (5); 80 мм (6), а также 140 мм (7), т.е. на ее необогреваемой поверхности (толщина огнезащиты 12,5 мм)

Fig. 12. Time dependencies of temperature in the concrete slab cross-sections, located on the heated surface (1), and at a distance from the heated surface, equal to 20 mm (2); 30 mm (3); 40 mm (4); 50 mm (5); 80 mm (6), and also 140 mm (7), that is, on its unheated surface (the thickness of the fireproofing is 12.5 mm)

цию данных, представленных на рис. 12. При обработке результатов, например, получено, что при толщине огнезащиты 20,5 мм (12,5 + 8 мм) и даже 16 мм (8 + 8 мм) время достижения температуры 500 °С на глубине 30 мм значительно превышает 180 мин. Таким образом, можно констатировать, что проведенный теплотехнический анализ результатов по огневым испытаниям железобетонных плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» общей толщиной 25 мм дал значительный объем важных результатов, которыми можно пользоваться в практике обеспечения огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций из железобетона.

Важным обстоятельством является возможность использования предложенного алгоритма анализа для обработки вновь получаемых результатов огневых экспериментов (например, при других толщинах огнезащиты и (или) при ином уровне нагрузок на железобетонную плиту) и уточнения представленных на рис. 11 и 12 результатов прогнозирования. Кроме того, можно констатировать, что подобным образом целесообразно проводить анализ и обработку результатов огневых испытаний не только железобетонных плит, но и других конструкций, а также других видов огнезащиты. Продемонстрирована также целесообразность обеспечения дополнительных термодина-

ных измерений при проведении подобных дорогостоящих огневых испытаний конструкций, в частности, на границе между их наружной поверхностью и огнезащитой.

Для более качественного теплотехнического анализа в дальнейшем необходим более точный учет влияния физической влаги, содержащейся и в огнезащитных плитах, и в теле бетона, на характеристики и прогрев как конструкций из бетона, так и их огнезащиты, поскольку все эти материалы являются влагосодержащими. Как отмечалось, такое влияние проявилось и в ходе рассмотренной серии огневых экспериментов. При расчетах проводился упрощенный учет влаги на теплофизические характеристики тяжелого бетона [25]. Однако при прогреве бетона и других влагосодержащих конструктивных и огнезащитных материалах реализуются сложные процессы тепломассопереноса. Используя сформулированные в [26–28] представления о механизме их протекания, можно дать следующую трактовку характера изменения рассматриваемых при анализе экспериментальных температурных кривых. Относительно быстрый подъем температуры приблизительно до 100 °С, зафиксированный термопарами, объясняется тепловыделением при конденсации пара, образовавшегося при нагреве влагосодержащих материалов и переместившейся по порам в бетоне воды в более холодную зону конструкции. Такая конденсация и концентрация влаги в менее прогретых зонах колонны могла стать причиной появления влаги в нижней части печи, что было отмечено в ходе третьего огневого эксперимента для колонн. Наличие плато (или «полок») на уровне 100 °С, как отмечалось ранее, объясняется кипением конденсата после нагрева соответствующей зоны конструкции до такой температуры.

Предпринимались попытки создания методик и программ теплотехнических расчетов, на основе математической модели, учитывающей указанную совокупность сложных процессов тепломассопереноса во влагосодержащих материалах [26–28], но они носили, по существу, характер научных изысканий и не позволили пока создать приемлемый для инженерной практики инструмент. В связи с этим на данный момент проведение предложенным образом моделирования прогрева железобетонных конструкций является вполне оправданным.

Естественно, к числу задач, решение которых еще предстоит найти, относится совершенствование статических расчетов огнестойкости железобетонных конструкций. И в этой связи одним из важных вопросов является определение неизвестных до настоящего времени коэффициентов условий работы γ_{bt} различных классов бетонов при высоких температурах. Их необходимо определять в дальнейшем как для конкретных бетонов без фибры, в том числе и для

тех, рецептуры которых содержат полипропиленовую микрофибру со специальными добавками, компенсирующими некоторое снижение прочности вследствие наличия ППМФ. Это позволит в дальнейшем более точно оценивать условия и критерии разрушения (в том числе и ВПЦ) несущих железобетонных конструкций за счет повышения точности тепло-статических расчетов огнестойкости. Необходимо также уточнение теплофизических характеристик всех возможных огнезащитных материалов, которые представляются наиболее эффективным средством защиты от пожара рассматриваемых конструкций.

В целом можно констатировать, что результаты исследований, представленные в статье, являются значимой составной частью решения актуальной проблемы обеспечения огнестойкости ответственных несущих строительных конструкций из железобетона. Продемонстрировано также, что для решения задачи по предотвращению взрывообразной потери целостности бетона и повышения огнестойкости конструкций иными (чем указанные в статье) средствами, необходимо проведение и анализ результатов соответствующего комплекса исследований.

Выводы

Проведен детальный анализ результатов серии испытаний в огневой печи образцов железобетонных колонн и плит перекрытий под нагрузкой. В ходе анализа:

1. Получены дополнительные свидетельства эффективности введения в состав бетона полипропиленовой микрофибры как средства для предотвращения взрывообразной потери целостности нагруженных колонн и плит из тяжелого бетона и обеспечения их требуемых пределов огнестойкости конструкций.

2. Продемонстрирована роль и особенности использования конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» как средства для предотвращения ВПЦ и обеспечения высоких пределов огнестойкости железобетонных конструкций.

3. Обоснована целесообразность и эффективность проведения теплотехнических расчетов по апробированным методикам и программам в одномерной и в двумерной постановке в качестве инструмента для анализа результатов проведенных испытаний.

Продемонстрированы возможности теплотехнических расчетов (моделирования) для пересчета результатов измерений при экспериментах на другие условия эксплуатации аналогичных конструкций, что необходимо для принятия обоснованных технических решений по огнестойкости железобетонных конструкций, подобных испытанным, а также по их огнезащите.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мешалкин Е.А. Исследование процесса разрушения бетонных изделий при пожаре с учетом их взрывообразной потери целостности : дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 216 с.
2. McNamee R.J., Bostrom L. Fire spalling—the moisture effect // 1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure—From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3–5, 2009. 2009. Pp. 120–129.
3. Jansson R. Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology. Stockholm : Trita-BKN, Bulletin, 2013. 117 p.
4. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Огнестойкость железобетонных туннелей подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.18.18322/PVB.2019.28.05.60-70
5. Новиков Н.С. Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 167 с.
6. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau, 2006. Nr. 101. Heft 8. Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
7. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety // Structural Engineering International. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
8. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety // Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. “SEE Tunnel: Promoting in SEE Region” ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambley. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
9. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan — Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining // Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions. Bergen, Norway, 2017. Pp. 1–10.
10. Liu J.-C., Tan K.H., Yao Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 184. Pp. 581–590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
11. Голованов В.И., Новиков Н.С., Павлов В.В., Антонов С.П. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращения, ликвидация. 2017. № 2. С. 65–69. DOI: 10.25257/FE.2017.2.63-67
12. Антонов С.П. Технологии предотвращения взрывообразного разрушения бетонов при огневом воздействии // Пожарная безопасность/ Специализированный каталог. 2021. С. 56–61.
13. Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасова И.П., Востров М.С. Полипропиленовая фибра — эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 15–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms and concrete // Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. Issue 2. Pp. 125–136. DOI: 10.1680/macr.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria // Magazine of Concrete Research, 2008. Vol. 60. Issue 3. Pp. 189–204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17. Issue 2. Pp. 259–264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 302–309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
18. Пухаренко Ю.В., Кострикин М.П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию // Строительные материалы и технологии. 2020. № 2 (88). С. 96–106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106
19. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
20. Ройтман В.М., Габдулин Р.Ш. Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 2. С. 11–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22413522>
21. Мешалкин Е.А. Антонов С.П. Об избыточности требований пожарной безопасности // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 2 (39). С. 26–29.
22. Антонов С.П. Российское противопожарное законодательство и требования по обеспечению огнестойкости железобетонных строительных конструкций // Технологии бетонов. 2018.

- № 11–12. С. 52–56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36403099>
23. *Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В.* Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 1. С. 23–42. DOI: 10.18322/PVB.2021.31.01.23-42
 24. *Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П.* Программные комплексы для расчетов тепломассопереноса в строительных конструкциях с огнезащитой с учетом термического разложения, вспучивания-усадки и испарения-конденсации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2001. Т. 10. № 4. С. 9–11.
 25. *Волков А.А., Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Федоров В.Ю.* Влияние влажности строительных материалов на точность расчетов прогрева конструкций при оценках их огнестойкости // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, в рамках VI Межд. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 207–212.
 26. *Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P.* High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material // *High Temperature*. 2000. Vol. 38. Issue 6. Pp. 921–925. DOI: 10.1023/a:1004149625276
 27. *Гаращенко А.Н., Страхов В.Л., Рудзинский В.П., Казиев М.М.* Расчет огнезащиты из материалов на основе минеральных вяжущих (на примере покрытия СОТЕРМ-1 м) // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2005. Т. 14. № 4. С. 17–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12601838>
 28. *Страхов В.Л., Мельников А.С., Каледин В.О.* Математическое моделирование высокотемпературного тепломассопереноса в бетонных конструкциях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2009. Т. 18. № 6. С. 29–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12837161>

REFERENCES

1. Meshalkin E.A. *Investigation of the process of destruction of concrete products in a fire, taking into account their explosive loss of integrity : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1979; 216. (rus).
2. McNamee R.J., Bostrom L. Fire spalling-the moisture effect. *1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure-From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling*. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3-5, 2009; 120-129.
3. Jansson R. *Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology*. Stockholm, Trita-BKN, Bulletin, 2013; 117.
4. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.18.18322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
5. Noikov N.S. *Fire resistance of fiber concrete constructions for auto roads tunnels and underground : Dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2019; 167. (rus).
6. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-635. DOI: 10.1002/best200608186 (ger).
7. Maraveas Ch., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
8. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection ends life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly*. Dubrovnik, Croatia, 2015; 1-10.
9. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan — Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions*. Bergen, Norway, 2017; 1-10.
10. Liu J-C., Tan K.H., Yao Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 184:581-590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
11. Golovanov V.I., Novikov N.S., Pavlov V.V., Antonov S.P. Strength characteristics of fiber reinforced concrete for tunnel structures in high temperatures. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2017; 2:65-69. DOI: 10.25257/FE.2017.2.63-67 (rus).
12. Antonov S.P. Technologies of concrete spalling preventing under fire action. *Fire Safety. Special Catalog*, 2021; 56-61.
13. Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P., Savrasova I.P., Vostrov M.S. Polypropylene fiber is an effective way to combat explosive destruction of concrete in case of fire. *Stroitel'nye Materialy/Construction Materials*. 2018; 11:15-20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20 (rus).
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms

- and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(2):125-136. DOI: 10.1680/mac.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(3):18-204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
 16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011; 17(2):259-264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
 17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:302-309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
 18. Pukharensko Yu.V., Kostrikin M.P. Resistance of fiber-reinforced concrete to high-temperatures. *Building and reconstruction*. 2020; 2(88):96-106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106 (rus).
 19. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1651-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
 20. Rojzman V.M., Gabdulin R.Sh. Ensuring of the reinforced concrete constructions durability against spalling under fire by thin layer intumescent fire retardant coating. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2013; 2:11-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22413522> (rus).
 21. Meshalkin E.A., Antonov S.P. On redundancy of fire safety requirements. *Natural and technogenic risks. Maintenance safety*. 2019; 2(39):26-29. (rus).
 22. Antonov S.P. Russian fire legislation and requirements for fire resistance of reinforced concrete building structures. *Technologies of concrete*. 2018; 11-12:52-56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36403099> (rus).
 23. Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P. Marchenkova S.V., Pavlov V.V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):23-42. DOI: 10.18322/PVB.2021.31.01.01.23-42 (rus).
 24. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinskii V.P. Software for simulation of temperature fields in fire resistant building constructions with taking into account the processes of thermal decomposition, intumescence — shrinkage and avaporation — condensation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
 25. Volkov A.F., Roytman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.U. Influence of building materials humidity on heating calculation accuracy at fire protecting grade. *Systemotechnique of building. Cyberphysique building systems, VI scientifique conference. Moscow, November 14-16, 2018*. Moscow, MGSU, 2018; 207-212. (rus).
 26. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material. *High Temperature*. 2000; 38(6):921-925. DOI: 10.1023/a:1004149625276
 27. Garashchenko A.N., Strakhov V.L., Rudzinskii V.P., Kaziev M.M. Calculation of fire protection from materials based on mineral binders (for example, SOTERM-1 m coating). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2005; 14(4):17-22. (rus).
 28. Strakhov V.L., Melnikov A.S., Kaledin V.O. Mathematical modeling of high-temperature heat and mass transfer in concrete structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 18(6):29-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12837161> (rus).

Поступила 28.02.2022, после доработки 08.04.2022;
принята к публикации 13.05.2022

Received February 28, 2022; Received in revised form April 8, 2022;
Accepted May 13, 2022

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, директор по науке, ООО «ПРОЗАСК», Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 42, стр. 1; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

АНТОНОВ Сергей Порфирьевич, соискатель на ученую степень кандидата наук, 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: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров»,

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Science Director, PROZASK, LLC, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Sergey P. ANTONOV, Applicant for the Degree of Candidate of Sciences, 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: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

Andrey I. DANILOV, Director, Research Center of Hazardous Fire Factors, LLC, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002,

Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

ПАВЛОВ Владимир Валерьевич, начальник сектора огнестойкости конструкций, 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: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

НОВИКОВ Николай Сергеевич, научный сотрудник сектора огнестойкости конструкций, 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: 942702; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Вклад авторов:

Гаращенко А.Н. — научное руководство, участие в анализе экспериментальной информации, проведение и анализ результатов расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Антонов С.П. — концепция исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, участие в анализе результатов расчетов, доработка текста, итоговые выводы.

Данилов А.И. — участие в разработке концепции исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, участие в доработке текста.

Павлов В.В. — руководство, обеспечение и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации.

Новиков Н.С. — участие в обеспечении и проведении огневых экспериментов, участие в анализе экспериментальной информации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Vladimir V. PAVLOV, Head of Sector, 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: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Nikolay S. NOVIKOV, Resercher, 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: 942702; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Contribution of the authors:

Anatoliy N. Garashchenko — scientific guidance, participation in the analysis of experimental information, conducting and analyzing the results of text calculations, describing the initial, final results of the survey.

Sergey P. Antonov — conceptual research, organization and participation in various firing experiments, analysis of experimental information, participation in the analysis of of text calculations, final conclusions.

Andrey I. Danilov — participation in the conceptual research, organization and conduct of firing experiments, analysis of experimental information, revision of the text.

Vladimir V. Pavlov — leadership, support and participation in conducting fire experiments, analysis of experimental information.

Nikolay S. Novikov — participation in the support and preparation conceptual research, participation in the analysis of experimental information.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74
 POZHAROVZRYVBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(3):65-74

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84+621.43.062

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74>

Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов

Владимир Николаевич Ложкин ✉

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Массовое применение на автомобильных двигателях каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров обострило проблему их возгорания и актуализировало научно-методическое обеспечение экспертизы причин пожарно-аварийных режимов (ПАР) эксплуатации топливно-каталитических агрегатов (ТКА). Подтверждена связь ПАР работы ТКА с отказами топливной аппаратуры, износами цилиндропоршневой группы двигателей и отклонениями состава топлива. Целью являлась разработка метода диагностики пожароопасных режимов эксплуатации ТКА автотранспорта.

Методология. Обоснована модель окислительного катализа в ТКА. Она обеспечивает расчет термokatалитической эффективности и генерации тепла в активном слое платинового катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от температуры отработавших газов (ОГ), концентрации CO, CH и сажи. Установлено, что теоретически процесс катализа может развиваться в четырех предельных областях: внутренняя кинетическая область, внутривязифузионная область, внешнедиффузионная область, внешнекинетическая область.

Результаты и обсуждение. Экспериментально-расчетные исследования показали вероятность аварийных автомобилей с многократным превышением выброса сажи и термической напряженности. На двигателе КамАЗ 10-кратное увеличение в ОГ CO, CH и сажи увеличивает тепловую производительность каталитической реакции с 17 282 до 491 907 кДж/ч, создавая угрозу возгорания. Для идентификации ПАР предложен метод диагностики на основе режима «свободного ускорения» (СУ) по ГОСТ 33997–2016. Процедура дополнена максимальными оборотами и ограничением (0,5 с) времени режима СУ. Последнее необходимо для гарантированного выхода двигателя на «внешнюю скоростную характеристику». Метод применен в пожарно-технических исследованиях автомобиля Ford Mondeo с дизелем TDCi («Common Rail System») и каталитическим сажевым фильтром. Лабораторными экспертно-аналитическими исследованиями было установлено, что основной причиной работы ТКА в аварийных (по экологической и пожарной опасности) режимах является накапливаемая при длительной эксплуатации коррозия прецизионных деталей топливной аппаратуры. Прогрессирующая коррозия происходит по причине избыточного содержания в топливе и масле серы и влаги.

Выводы. Показано, что аварийный перегрев каталитического нейтрализатора приводит к резкому увеличению риска возгорания автомобиля. Предложен оригинальный метод диагностики пожароопасных режимов эксплуатации нейтрализаторов на основе процедур ГОСТ 33997–2016 (ТР ТС 018/2011).

Ключевые слова: автомобиль; двигатель; неисправность; отработавшие газы; пожарный риск; математическая модель; эксперимент; расчеты; метод диагностики

Автор выражает благодарность научному руководителю проектов Института безопасности дорожного движения при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», д-ру техн. наук, профессору Кравченко П.А. за предоставленную возможность проведения инструментального контроля эколого-пожароопасных режимов работы ТКА автомобилей в Центре технических экспертиз и полезные научно-методические консультации.

Для цитирования: Ложкин В.Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74

✉ Ложкин Владимир Николаевич, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters

Vladimir N. Lozhkin ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The wide-scale use of catalytic converters and particulate filters in automobile engines has aggravated the problem of their ignition and updated the research and methodological framework for the examination of causes of fire emergency modes (FEMs) of operation of fuel catalytic units (FCUs). The relationship between the FEMs of the FCU operation and failures of the fuel equipment, wear of the cylinder-piston group of engines and deviations in fuel compositions was confirmed. The goal was to develop a diagnostic method for fire hazardous modes of operation of FCUs of vehicles.

Methodology. A model of oxidative catalysis underway in the FCU has been proven rational. The model is used to calculate the thermo-catalytic efficiency and heat generation in the active layer of the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ platinum catalyst depending on the temperature of exhaust gases (EG), concentrations of CO, CH and soot. It has been found out that catalysis can theoretically develop in four limit domains: internal kinetic domain, internal diffusion domain, external diffusion domain, and external kinetic domain.

Results and discussion. Experimental and computational studies have shown the probability of emergence of breakdown vehicles with a multiple excess of soot emissions and thermal stresses. A 10-fold increase in CO, CH and soot in EG rises the thermal performance of the catalytic reaction from 17,282 to 491,907 kJ/h, creating a fire hazard in a KamAZ engine. To identify a FEM, the diagnostic method based on the "free acceleration" (FA) mode according to GOST 33997–2016 is proposed. The procedure is supplemented with maximum revolutions and restrictions (0.5 s) of the FA mode time. The latter is necessary for the guaranteed operation of the engine in the "full load mode". The method was applied in the course of the fire engineering studies on a Ford Mondeo car having a TDCi (Common Rail System) diesel engine and a catalytic particulate filter. Laboratory examination and analytical studies have found that the main reason for the operation of FCU in emergency (due to environmental and fire hazards) modes is the corrosion of precision parts of the fuel equipment accumulated during its long-term operation. Progressive corrosion is caused by excessive sulfur and moisture content in fuel and oil.

Conclusions. It's been proven that the emergency heating of a catalytic converter causes a sharp rise in the car combustion risk. The authors have proposed an original method for the diagnostics of fire-hazardous modes of operation of catalytic converters based on procedures set in GOST 33997–2016 (TP TC 018/2011).

Keywords: automobile; engine; malfunction; exhaust gases; fire risk; mathematical model; experiment; calculations; diagnostic method

The author would like to express his thanks to professor P.A. Kravchenko, Doctor of Engineering Sciences, a research advisor for projects of the Institute of Traffic Safety of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering" for an opportunity to perform the instrumentation control of the fire hazardous modes of operation of fuel catalyst units of automobiles at the Centre for Engineering Examination and helpful research and methodology-focused advice.

For citation: Lozhkin V.N. Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):65-74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74 (rus).

✉ Vladimir Nikolaevich Lozhkin, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

Введение

Бурное развитие промышленности, транспорта и энергетики в течение новейшей истории усугубило глобальные и региональные угрозы стабильному развитию цивилизации, связанные с нарастающим изменением климата из-за парникового эффекта и опасным для здоровья людей загрязнением атмосферного воздуха поллютантами [1–4]. Реакция прогрессивного человечества на парирование новых смертоносных техногенных угроз была мгновенной [1]. Она инициировала мониторинговые и технологические исследования специфических явлений новой проблемы [1, 4–8], предложила оригинальные технические решения минимизации выброса парниковых газов, декарбонизации процессов получения потребительских мощностей, утилизации тепла для эксплуатируемых и новых, запускаемых в обращение объектов энергетики и транспорта [1, 3, 5, 8, 9].

Уже к 2018 году мировой и отечественный [10] рынки наполнились автомобилями¹, оснащенными ультрасовременными техническими системами «common rail system», «CRT system» (окислительный катализ с фильтрацией сажи), «SCR system» (селективный катализ NO_x) и так далее. Странами Европейского Союза освоен эколого-технологический уровень 6+ и на пороге 7-й уровень [1], способный конкурировать в использовании чистой энергии с электромобильным приводом. Однако усложнение конструкций стало проявляться в уменьшении их надежности и, как следствие, в отказах, приводящих к эколого-пожароопасным аварийным режимам эксплуатации ТКА.

Пожарная опасность ТКА связана с тем, что в электронно-управляемых их конструкциях появились источники мощного инфракрасного (тепло-

¹ Автомобильный рынок России 2018. Ежегодный справочник аналитического агентства «Автостат». М., 2018. 288 с. URL: <https://www.autostat.ru/research/product/274/> (дата обращения: 23.02.2022).

вого) излучения — пламегасители, системы термокаталитической нейтрализации отработавших газов, каталитически-регенерируемые сажевые фильтры и так далее [11–19], включая конструкции с принудительным электрическим разогревом матриц реактора от аккумулятора [15, 18, 19]. Участились случаи, когда при аварийных отказах систем автоматического регулирования состава топливно-воздушной смеси [16] и поддержания оптимальной температуры в реакторе [18, 19] неуправляемое тепловыделение в нем приводило к плавлению матриц [11] и возгоранию транспортного средства (рис. 1). Проблема резко усугубилась повсеместными в сети автосервиса РФ предложениями платных услуг блокировки системы контроля состава топливно-воздушной смеси по сигналам λ -зонда (тюнинг-услуга «прошивки» цифрового электронного блока контроля экологической безопасности). Процедура не согласована с фирмами-производителями автомобилей. Последняя проблема широко обсуждается специалистами на международных специализированных конференциях в РФ.

Все вышеотмеченное актуализировало тему работы, целью которой являлась разработка метода диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов, и поставило необходимость решения следующих основных задач:

- разработать феноменологическую модель кинетики процесса конверсии ОГ в каталитическом нейтрализаторе (КН) для изучения и понимания физико-химической природы обезвреживания ОГ и аварийного тепловыделения в КН;
- провести по модели, с использованием данных эксперимента на двигателе с КН, расчеты эффективности работы активного слоя, степени обезвреживания ОГ и подтвердить ими вероятность пожароопасного тепловыделения;
- на основе понимания кинетики физико-химического модельного процесса катализа разработать метод диагностирования эколого-пожароопасных режимов эксплуатации автомобилей;
- проведением экспертных исследований на аварийных автомобилях установить характерные для России причины отказов ТКА.

Методология

Из теории и практики организации рабочих процессов сгорания в поршневых двигателях [7, 9, 11, 16] логично заключить, что аварийный неуправляемый пожароопасный разогрев каталитических матриц обусловлен неконтролируемым увеличением в составе ОГ на выпуске из цилиндров двигателя продуктов неполного сгорания топлива, а именно: оксида углерода CO, суммарных углеводородов СН и сажи.



a



b

Рис. 1. Иллюстрация последствий реализации аварийного эколого-пожароопасного режима эксплуатации автомобильного ТКА: *a* — пожароопасный разогрев каталитического нейтрализатора при неисправности двигателя; *b* — оплавленные фрагменты керамических сотовых матриц

Fig. 1. An illustration of the consequences of the fire emergency mode of operation of catalytic converters in automobiles: *a* shows the fire-hazardous heating of a catalytic converter in case of the engine breakdown; *b* shows the fire-damaged fragments of cellular ceramic matrixes

Уместно отметить, что эти же вещества несут в себе угрозу для здоровья людей [1]. В работе [5] автором настоящей статьи для решения подобных задач были разработаны основы кинетического анализа предельных областей и характера протекания окислительного гетерогенного катализа в проточных каналах матриц сотовой конструкции в зависимости от температуры ОГ, концентрации в них горючих веществ, а также скоростей доставки к каталитической поверхности реактантов из «ядра» потока и отвода от нее продуктов реакций (скорости диффузии веществ). Стало понятным, что уровень температуры в зоне катализа, в условиях аварийного разогрева ТКА определяемый температурой остаточных газов в цилиндре двигателя или интенсивностью электрического разогрева матрицы носителя, в несоизмеримо большей мере способен оказать влияние на скорость химической

реакции (рост близкий к экспоненте), чем на скорость диффузии реагентов.

На рис. 2 в наглядной графической форме показаны вероятные, применительно ко всему спектру эксплуатационных режимов работы автомобильных ТКА [5] предельные области протекания кинетики процесса катализа в блочных нейтрализаторах ОГ сотовой конструкции: в безразмерных координатах a — $\lg W - T^{-1}$ зависимости Аррениуса (где W — характеристика скорости результирующего процесса, а T — температура в зоне протекания гетерогенной химической реакции катализа) и b — $C - l$ в условном качественном представлении графиков изменения концентрации реагентов в «ядре» потока ОГ и активном слое катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ толщиной H (где C — концентрация реагентов, а l — удаленность, от поверхности носителя, слоя катализатора L , в котором протекает химическая реакция катализа с выделением тепла) [5, 9].

На основе не приводимых в статье по причине большого объема материала аналитических выкладок и результатов оценочных экспериментов и расчетов, которые в детальной полноценной форме изложены в работах [5, 9, 11] применительно к авторским конструкциям нейтрализаторов, далее приводятся резуль-

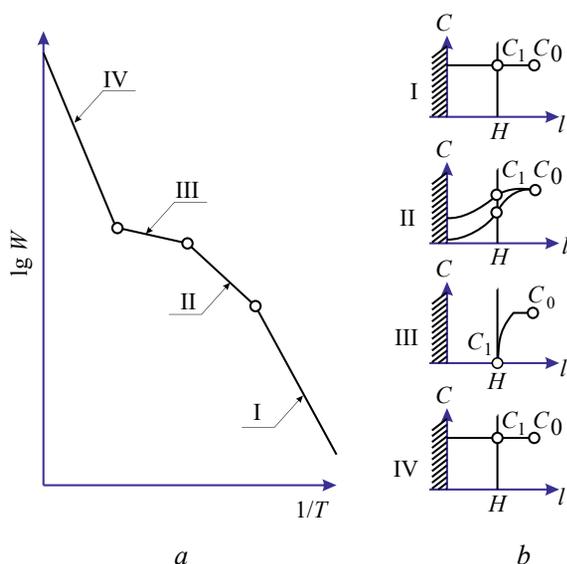


Рис. 2. Предельные области протекания процесса катализа ОГ в каналах блочного нейтрализатора [5]: C_0, C_1 — безразмерные концентрации реагентов, соответственно, в «ядре» потока ОГ и на внешней поверхности слоя катализатора толщиной H ; I — внутренняя кинетическая область; II — внутренняя диффузионная область; III — внешняя диффузионная область; IV — внешняя кинетическая область

Fig. 2. The limit domains of the EG catalysis process in channels of the block catalyst [5]: C_0, C_1 are dimensionless concentrations of reactants, respectively, in the “nucleus” of the EG flow and on the external surface of the catalyst layer that has thickness H ; I is the internal kinetic domain; II is the internal diffusion domain; III is the external diffusion domain; IV is the external kinetic domain

тирующие рабочие гипотезы, уравнения и феноменология описания характеристик пожароопасного аварийного физического явления, понимание которого позволило отработать инструментальный метод его диагностирования в ТКА.

Уравнение для оценки скорости результирующего процесса нейтрализации с учетом диффузионного торможения (где индекс m , в отличие от c , по смыслу подчеркивает это):

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = \frac{\frac{Nu_D \cdot D}{d_{\text{экв}}} \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k^1}}{\left(\frac{Nu_D \cdot D}{d_{\text{экв}}} + \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k^1}\right)} \cdot C_0, \quad (1)$$

где Nu_D — диффузионный критерий Нуссельта;

D — коэффициент, учитывающий диффузию реагентов в «ядре» потока ОГ;

$d_{\text{экв}}$ — характеристика «эквивалентного диаметра» канала матрицы;

$D_{\text{эф}}$ — условный показатель диффузии реагентов внутри пористого слоя катализатора толщиной H (рис. 2, b), физический смысл которого определяется соотношением:

$$dc/dt = D_{\text{эф}} \cdot \Delta c - W'(c), \quad (2)$$

где Δ — оператор Лапласа;

c — концентрация реагента в произвольном элементе пористого слоя катализатора;

$W'(c)$ — «эффективная скорость» химической реакции внутри слоя катализатора, определяемая по уравнению $W'(c) = k'c^n$;

k' — константа «псевдообъемной» гомогенной химической реакции внутри слоя [5];

$k' = k \cdot S_v$;

k — постоянная скорости «истинной» химической реакции по закону Аррениуса;

S_v — удельная капиллярная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

n — порядок этой химической реакции в соответствии с зависимостью Аррениуса [11].

Эффективность работы активного слоя η в канале сотовой матрицы оценивалась степенью проникновения химической реакции катализа на глубину L капиллярного слоя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ толщиной H (рис. 2, b) по уравнению [5]:

$$\eta = \frac{\int_{l=L}^{l=H} k' \cdot c(l) dl}{k' \cdot c_1} \cong th\Psi/\Psi, \quad (3)$$

где $th\Psi/\Psi$ — функция гиперболического тангенса модуля Тиле $\Psi = L\sqrt{k'/D_{\text{эф}}}$.

Интегрирование (3) осуществляется в границах (смотри рис. 2, b): $dc/dl = 0$ (при $l = H - L$); $C = C_1$ (при $l = H$). По физическому смыслу функция η показывает закономерность влияния «диффузионного

торможения» на скорость результирующего процесса (1) в порах катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от температуры. Положительной особенностью модели, с условной заменой гетерогенной реакции катализа на активной поверхности по зависимости «чистой кинетики» Аррениуса, псевдообъемной гомогенной реакции катализа в толще капиллярного слоя $H\text{-}L$ по уравнению (1) [5, 11] позволяло без труда производить оценку скорости результирующего процесса с учетом внутрипоровой кинетики (в извилистых капиллярных сосудах пор нерегулярной геометрии) по моделям Фольмера и Кнудсена [5]. По причине большого объема материалов моделирования данных феноменов [5] они присутствуют в обосновании кинетической теории возгорания КН данной статьи «по умолчанию».

Для уточнения области и характера кинетики развития аварийного режима разогрева ТКА в соответствии с методикой [5] были использованы результаты испытаний дизеля 8ЧН 12/12 (КАМАЗ) с КН оригинальной конструкции [11] в ОАО КАМАЗ на специализированном оборудовании, соответствующем требованиям сертификационных испытаний Правил № 49 Европейской Экономической Комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) [11]. Расчетами по данным этих испытаний была установлена справедливость соотношений (4):

$$\frac{Nu_D D}{d_{\text{экв}}} \gg \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k'} \text{ и } H \gg L \gg \delta, \quad (4)$$

которая доказывает, согласно методологии [5], вероятность протекания процесса катализа, пограничного с аварийным разогревом ТКА, во внутренней диффузионной области (на рис. 2 это область II).

Оценка производства тепла реакциями катализа на режимах работы ТКА, пограничных с аварийным разогревом, производилась (смотри схему рис. 3) по соотношению, моделирующему связь температуры по глубине катализатора с измеренными концентрациями реагирующих веществ:

$$D_{\text{эф}} \frac{dc}{dl} \cdot \Delta H = \lambda \frac{dT}{dl}, \quad (5)$$

после интегрирования которого получаем:

$$\Delta T = T - T_1 = \frac{(-\Delta H) \cdot D_{\text{эф}}}{\lambda} (c_1 - c), \quad (6)$$

где T — значение текущей температуры реакции, К;
 ΔH — перепад энтальпии при реакции, кДж/моль;
 λ — коэффициент теплопроводности носителя на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Вт/(м·К);
 c_1 и T_1 — значения концентрации реагирующего вещества и температуры на условной

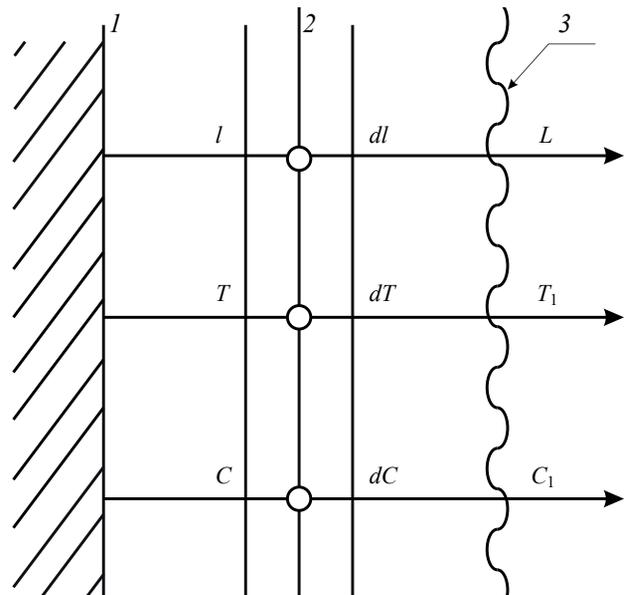


Рис. 3. Схема структуры активного слоя КН для расчета выделения в нем тепла: 1 — условная внешняя поверхность катализатора со стороны ядра потока ОГ; 2 — плоскость условного сечения в катализаторе на некотором расстоянии l от металлической (керамической) подложки носителя; 3 — поверхность металлической (керамической) подложки носителя

Fig. 3. The layout of an active layer of a catalytic converter needed to calculate heat emissions: 1 is the conventional external surface of the catalyst if viewed from the nucleus of the EG flow; 2 is the plane of a conventional section of a catalyst at some distance l from the metal (ceramic) support of the carrier; 3 is the surface of the metal (ceramic) support of the carrier

внешней поверхности катализатора со стороны ядра потока ОГ;

c — значение текущей концентрации реагентов, моль/м³ (рис. 3).

Производство тепла реакцией рассчитывалось, суммарно q_{Σ} , по измеряемым значениям концентраций СО, СН и сажи на входе и выходе из КН.

Результаты и обсуждение

Расчеты по разработанной модели и данным испытаний дизеля 8ЧН 12/12 (КАМАЗ) с КН на режимах Правил № 49 ЕЭК ООН (ТР ТС 018/2011) показали, что эффективность работы активного слоя катализатора изменяется в пределах значений $\eta = 20 \dots 95 \%$; меньшие значения отвечают полной (максимальной) нагрузке, большие значения — режиму холостого хода без внешней нагрузки. При этом производство тепла изменялось в диапазоне значений $q_{\Sigma} = 203 \dots 28\,167$ кДж; большие значения отвечают полной (максимальной) нагрузке, меньшие значения — режиму холостого хода без внешней нагрузки. Результаты соответствуют выбросам с ОГ горючих (токсичных) веществ исправного двигателя и ТКА. Ранее многочисленными автор-

сками² [2, 4, 10] и зарубежными [1, 6, 20] исследованиями было установлено, что на дорогах РФ и западных стран, порою, наблюдаются аварийные автомобили с 20–40-кратным превышением выброса с ОГ горючих (токсичных) веществ. Все это является свидетельством того, что кинетика предаварийной эколого пожароопасной работы ТКА начинает развиваться во внутридиффузионной области (нижний график II на рис. 2, *b*) с высокой вероятностью перехода процесса во внешнюю диффузионную область (III на рис. 2). При экстремальной (чрезвычайной) тепловой производительности КН аварийного автомобильного двигателя становится вероятной и внешняя кинетическая область (IV на рис. 2).

Адаптация разработанной авторской методологии к процессам проведения пожарно-технических экспертиз производилась для многих типов и моделей ТКА современного автотранспорта. Для выявления эколого пожароаварийных дизельных двигателей разработан метод с использованием диагностических критериев дымности ОГ на режимах максимальной частоты вращения коленчатого вала и свободного ускорения (СУ) с нагружением силами инерции собственных вращающихся и возвратно-поступательно двигающихся масс. Для гарантированного вывода нагрузки на «внешнюю скоростную характеристику» время воздействия на рычаг акселератора не должно превышать 0,5 с. Воспроизводимость идентификационного теста СУ по ГОСТ 33997–2016³ обеспечивается электромеханическим манипулятором. Процедура тестирования ТКА совмещается с контролем технического состояния автотранспорта на станциях диагностики ГИБДД с помощью измерителя непрозрачности ОГ MDO2 фирмы МАХА (рис. 4).

В таблице в качестве примера приведены результаты тестирования в режиме СУ на эколого пожароопасное состояние ТКА двигателя TDCi с «Common Rail System» аварийного автомобиля Ford Mondeo. Водитель обратился в Центр независимой экспертизы ИБДД СПбГАСУ после неудачных взаимодействий в дилерской компании.

Показания таблицы свидетельствуют о регистрации обильного дымления (сажеобразования) на тестовых режимах, значительно превышающих «пороговые» значения диагностических характеристик X_M . В условиях эксплуатации работу двигателя



Рис. 4. Измеритель непрозрачности ОГ MDO2 фирмы МАХА
Fig. 4. MDO2 exhaust gas opacity meter made by МАХА

на таких режимах водитель наблюдал при быстрых разгонах автомобиля, а при включении ргенерации от сажи ТКА водитель наблюдал разогрев сажевого фильтра до «малинового» цвета. Эти факты свидетельствуют, что разработанная процедура тестирования гарантирует выход двигателя на «внешнюю скоростную характеристику» и, следовательно, — «попадание» в теоретически требуемые для диагностики пожароопасной ЧС области II–III (рис. 2) экзотермического процесса катализа в керамических матрицах фильтра сажи.

Многолетний опыт проведения пожарно-технических экспертиз показывает, что аварийные режимы работы ТКА автомобильных двигателей могут наступить в разные периоды их эксплуатации, но с весьма характерными чертами отказов. Лабораторный анализ проб топлива, отобранных из топливного бака и корпуса фильтра тонкой очистки, ранее упомянутого аварийного автомобиля Ford Mondeo с дизельным двигателем TDCi, показал недопустимо высокое содержание в них механических примесей, влаги, углеводородов легких фракций, меркаптановой серы и сероводорода. Например, дефектация после разборки топливной системы другого пожароаварийного дизельного автомобиля HYUNDAI Santa Fe CLASSIC свидетельствовала о явно выраженных следах накопленного коррозионного разрушения поверхностей прецизионных деталей топливной аппаратуры по причине недоброкачественного топлива, обнаруженного в эколого пожароопасном автомобиле. На рис. 5 приведены фото элементов топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунки со следами (свидетельствами) коррозионного разрушения. Авторскими пожарно-техническими

² Ложкин В.Н., Невмержицкий Н.В., Ложкина О.В. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5 // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 206–209.

³ ГОСТ 33997–2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки: ИСС «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241> (дата обращения: 23.02.2022 г.).

Результаты контроля автомобиля Ford Mondeo после регенерации фильтра сажи
 Ford Mondeo testing results following the regeneration of the soot filter

Номер испытаний Test number	Показание $X_M, м^{-1}$ Value $X_M, м^{-1}$	Средняя величина $X_M, м^{-1} (%)$ Average $X_M, м^{-1} (%)$	Пороговая величина, $м^{-1} (%)$ Threshold value, $м^{-1} (%)$
Испытания на режимах максимальной частоты вращения коленчатого вала ($n_{max \text{ х.х.}}$) Testing at maximum RPM ($n_{max \text{ х.х.}}$)			
Обозначения диагностических характеристик по ГОСТ 33997–2016 [21] Symbols of diagnostic characteristics pursuant to GOST 33997–2016 [21]			
1	1,64	$\approx 1,3 (40)$	0,4 (15)
2	1,33		
3	1,15		
4	1,24		
Испытания на режимах свободного ускорения (СУ) Free acceleration testing			
1	5,90	$\approx 4,0 (80)$	1,6 (50)
2	4,29		
3	3,35		
4	3,48		
5	3,71		
6	3,33		

исследованиями установлено, что массовыми причинами наблюдаемых эколого пожароопасных режимов эксплуатации ТКА бензиновых и газобаллонных автомобилей являются: отравление и механическая блокировка активной поверхности ката-

лизатора, термическое разрушение керамических матриц, неисправности в электронно-цифровых системах регулирования состава топливовоздушной смеси по сигналам кислородного датчика, выход из строя λ -зонда.



a



b

Рис. 5. Свидетельства коррозионного разрушения элементов топливной аппаратуры аварийного автомобиля Ford Mondeo с двигателем TDCi: a — следы коррозионного разрушения на внутренних поверхностях корпуса форсунки; b — следы коррозионного разрушения на поверхностях корпуса гильзы ТНВД и всасывающего клапана

Fig. 5. The evidence of corrosive failure of elements of fuel injection equipment in a breakdown Ford Mondeo with a TDCi engine: a are traces of corrosive failure on the inner surfaces of the injector; b are traces of corrosive failure on the surfaces of the cartridge case of the high-pressure fuel pump and the suction valve

Выводы

Аварийное техническое состояние топливно-каталитических агрегатов (ТКА) современных автомобилей в эксплуатации представляет двойную чрезвычайную опасность для населения: высокий риск возгорания транспортного средства и обильный выброс с его отработавшими газами парниковых газов и сильнейших токсичных веществ. Автором разработан на основе изучения и понимания кинетики процесса катализа в матри-

цах блочной конструкции безразборный метод диагностирования эколого-пожароопасных режимов эксплуатации ТКА по составу ОГ, который позволяет надежно идентифицировать неисправные транспортные средства. Внедрение разработанного метода в систему организации пожарно-технических экспертиз МЧС России позволяет своевременно обнаружить и вывести из обращения на дорогах РФ транспортные средства с аварийными ТКА и тем самым снизить риски ЧС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M.* Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4
2. *Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V.* A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 453–458. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.124
3. *Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation // *Environmental Management*. 2017. Vol. 60. Issue 4. Pp. 758–783. DOI: 10.1007/s00267-017-0896-2
4. *Lozhkina O.V., Lozhkin V.N.* Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates // *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2016. Vol. 47. Pp. 251–264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008
5. *Ложкин В.Н.* Теория и практика безразборной диагностики и каталитической нейтрализации отработавших газов дизелей : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1995. 444 с.
6. *Shancita I., Masjuki H., Kalam M., Fattah I.R., Rashed M., Rashedul H.* A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 88. Pp. 794–807. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.036
7. *Baturin S.A., Lozkin V.N., Keiser E.* Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnell-drehender Dieselmotoren // *Kraftfahrzeugtechnik*. 1979. Vol. 2. S. 44–46.
8. *Kaiser E.W., Siegl W.O., Trinker F.H., Cotton D.F., Cheng W.K., Drobot K.* Effect of engine operating parameters on hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark-ignited engine // *SAE Technical Paper Series*. 1995. DOI: 10.4271/950159
9. *Gao J., Tian G., Sorniootti A.* On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle // *Energy Science and Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 6. Pp. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416
10. *Ложкина О.В., Онищенко И.А.* Методика оценки выбросов опасных компонентов отработавших газов при пуске и прогреве двигателей автотранспортных средств в климатических условиях Арктики // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2020. № 3. С. 30–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44108901>
11. *Costagliola M.A., Prati V., Mariani A., Unich A., Morrone B.* Gaseous and particulate exhaust emissions of hybrid and conventional cars over legislative and real driving cycles // *Energy and Power Engineering*. 2015. Vol. 07. Issue. 05. Pp. 181–192. DOI: 10.4236/epe.2015.75018
12. *Gänzler A.M., Casapu M., Doronkin D.E., Maurer F., Lott P., Glatzel P. et al.* Unravelling the different reaction pathways for low temperature CO oxidation on Pt/CeO₂ and Pt/Al₂O₃ by spatially resolved structure–activity correlations // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2019. Vol. 10. Issue 24. Pp. 7698–7705. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.9b02768
13. *Gao J., Tian G., Sorniootti A.* Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 147. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037
14. *Leman A.M., Jajuli A., Feriyanto D., Rahman F., Zakaria S.* Advanced catalytic converter in gasoline engine emission control: A review // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 87. P. 02020. DOI: 10.1051/mateconf/20178702020
15. *Khan S.R., Zeeshan M., Iqbal S.* Thermal management of newly developed non-noble metal-based catalytic converter to reduce cold start emissions of small internal combustion engine // *Chemical Engineering Communications*. 2018. Vol. 205. Issue 5. Pp. 680–688. DOI: 10.1080/00986445.2017.1412311
16. *Getsoian A.B., Theis J.R., Lambert C.K.* Sensitivity of three-way catalyst light-off temperature to air-fuel ratio // *Emission Control Science and*

- Technology. 2018. Vol. 4. Issue 3. Pp. 136–142. DOI: 10.1007/s40825-018-0089-3
17. Kannepalli S., Gremminger A., Tischer S., Deutschmann O. Optimization of axial catalyst loading in transient-operated zone-structured monoliths: Reduction of cumulative emissions in automotive oxidation catalysts // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 174. Pp. 189–202. DOI: 10.1016/j.ces.2017.09.013
 18. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle // *Energy Science & Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 6. Pp. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416
 19. Ning J., Yan F. Temperature control of electrically heated catalyst for cold-start // *Emission Improvement. IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. Issue 11. Pp. 14–19. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.08.003
 20. Tsinoglou D.N., Weilenmann M. A simplified three-way catalyst model for transient hot-mode driving cycles // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48. Issue 4. Pp. 1772–1785. DOI: 10.1021/IE8010325

REFERENCES

1. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. *Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health*. Springer, 2020; 417. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4
2. Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36:453-458. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.124
3. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation. *Environmental Management*. 2017; 60(4):758-783. DOI: 10.1007/s00267-017-0896-2
4. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2016; 47:251-264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008
5. Lozhkin V.N. *Theory and practice of in-place diagnostics and catalytic neutralization of diesel exhaust gases : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 1995; 444. (rus).
6. Shancita I., Masjuki H., Kalam M., Fattah I.R., Rashed M., Rashedul H. A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2014; 88:794-807. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.036
7. Baturin S.A., Lozhkin V.N., Keiser E. Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnell-drehender Dieselmotoren. *Kraftfahrzeug-technik*. 1979; 2:44-46. (ger).
8. Kaiser E.W., Siegl W.O., Trinker F.H., Cotton D.F., Cheng W.K., Drobot K. Effect of engine operating parameters on hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark-ignited engine. *SAE Technical Paper Series*. 1995. DOI: 10.4271/950159
9. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle. *Energy Science and Engineering*. 2019; 7(6):2383-2397. DOI: 10.1002/ese3.416
10. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Methodology for assessing emissions of hazardous components of exhaust gases during the start-up and warm-up of motor vehicle engines in the climatic conditions of the Arctic. *Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2020; 3:30-37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44108901> (rus).
11. Costagliola M.A., Prati V., Mariani A., Unich A., Morrone B. Gaseous and particulate exhaust emissions of hybrid and conventional cars over legislative and real driving cycles. *Energy and Power Engineering*. 2015; 7(5):181-192. DOI: 10.4236/epe.2015.75018
12. Gänzler A.M., Casapu M., Doronkin D.E., Maurer F., Lott P., Glatzel P. et al. Unravelling the different reaction pathways for low temperature co oxidation on Pt/CeO₂ and Pt/Al₂O₃ by spatially resolved structure–activity correlations. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2019; 10(24):7698-7705. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.9b02768
13. Gao J., Tian G., Sornioti A. Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 147:177-187. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037
14. Leman A.M., Jajuli A., Feriyanto D., Rahman F., Zakaria S. Advanced catalytic converter in gasoline engine emission control: A review. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 87:02020. DOI: 10.1051/mateconf/20178702020
15. Khan S.R., Zeeshan M., Iqbal S. Thermal management of newly developed non-noble metal-based catalytic converter to reduce cold start emissions of small internal combustion engine. *Chemical Engineering Communications*. 2018; 205(5):680-688. DOI: 10.1080/00986445.2017.1412311
16. Getsoian A.B., Theis J.R., Lambert C.K. Sensitivity of three-way catalyst light-off temperature to air-fuel ratio. *Emission Control Science and Tech-*

- nology*. 2018; 4(3):136-142. DOI: 10.1007/s40825-018-0089-3
17. Kannepalli S., Gremminger A., Tischer S., Deutschmann O. Optimization of axial catalyst loading in transient-operated zone-structured monoliths: Reduction of cumulative emissions in automotive oxidation catalysts. *Chemical Engineering Science*. 2017; 174:189-202. DOI: 10.1016/j.ces.2017.09.013
 18. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle. *Energy Science & Engineering*. 2019; 7(6):2383-2397. DOI: 10.1002/ese3.416
 19. Ning J., Yan F. Temperature control of electrically heated catalyst for cold-start. *Emission Improvement. IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(11):14-19. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.08.003
 20. Tsinoglou D.N., Weilenmann M. A simplified three-way catalyst model for transient hot-mode driving cycles. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009; 48(4):1772-1785. DOI: 10.1021/IE801032

*Поступила 25.02.2022, после доработки 04.04.2022;
принята к публикации 16.05.2022*

*Received February 25, 2022; Received in revised form April 4, 2022;
Accepted May 16, 2022*

Информация об авторе

ЛОЖКИН Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства; Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 369765; Scopus Author ID: 56566370300; ORCID: 0000-0001-6381-0519; e-mail: vnlojkin@yandex.ru

Information about the author

Vladimir N. LOZHKIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Rescue Equipment and Fire Vehicles, Saint Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E. N. Zinichev, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 369765; Scopus Author ID: 56566370300; ORCID: 0000-0001-6381-0519; e-mail: vnlojkin@yandex.ru

Классификация гостиниц с учетом пожарных рисков

Владимир Иванович Присадков, Наталия Ивановна Константинова,
Светлана Витальевна Муслакова ✉, Александр Анатольевич Абашкин

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. Действующее в России Положение о классификации гостиниц практически не учитывает состояние их пожарной безопасности. Принятая в Положении система предусматривает экспертную балльную оценку параметров гостиниц для их отнесения к определенной категории (звездности). Целью статьи является разработка методов, позволяющих определять уровень пожарной безопасности гостиниц также в баллах, соизмеримых с принятой системой оценок, для дальнейшего использования при присвоении гостиницам соответствующих категорий.

Теоретические основы методов балльной оценки пожарной безопасности гостиниц. Разработаны три подхода к расчету «пожарных баллов» для гостиниц, основанные на делении гостиниц на классы и определении показателя пожарной безопасности гостиниц в пределах одного класса. Первый метод балльной оценки — индексный метод Гретенера расчета интегрального показателя пожарной безопасности. Для полученной статистики гостиниц определяются первый и третий квартили. Гостиницы, для которых значение показателя не превышает первый квартиль, относятся к подгруппе с высоким уровнем пожарной безопасности; в интервале от первого (включительно) до третьего квартиля — к среднему уровню. Если значения показателя пожарной опасности гостиниц не меньше третьего квартиля, то они относятся к подгруппе с низким уровнем пожарной безопасности. Второй метод основан на использовании «запаса безопасности» по времени эвакуации людей. Третья модель оценки пожарной опасности гостиниц включает: деление гостиниц на группы; определение величины индивидуального пожарного риска; ранжирование гостиниц по величине пожарного риска от наименьшего значения к наибольшему.

Результаты и их обсуждение. Некоторые сложности соединения физического подхода к определению пожарной опасности с экспертным методом балльной оценки при классификации гостиниц решаются за счет выбора пропорции между баллами используемой системы и «пожарными баллами», задаваемой коэффициентом настройки. Присваиваемые подгруппам гостиниц «пожарные баллы» имеют ориентировочный характер и должны быть уточнены в рамках предложенного подхода.

Выводы. Опытное применение разработанных методов на примерах реальных гостиниц позволит выбрать оптимальный инженерный метод учета уровня пожарной безопасности гостиниц при их классификации.

Ключевые слова: пожарная безопасность; группировка гостиниц; балльные оценки безопасности; пожарные баллы; коэффициент настройки

Для цитирования: Присадков В.И., Константинова Н.И., Муслакова С.В., Абашкин А.А. Классификация гостиниц с учетом пожарных рисков // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 75–83. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.75-83

✉ Муслакова Светлана Витальевна, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Classification of hotels taking into account fire risks

Vladimir I. Prisdakov, Nataliya I. Konstantinova, Svetlana V. Muslakova ✉,
Aleksandr A. Abashkin

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 current Russian Regulation on classification of hotels hardly takes into account their fire safety conditions. The system, adopted in the Regulation, provides for an expert scoring assessment of hotel parameters for their assignment to a certain category (star rating). The purpose of the article is to develop methods that allow determining the level of fire safety of hotels in points commensurate with the accepted rating system, for its further use in the course of assignment of appropriate categories to hotels.

Theoretical fundamentals of scoring methods of assessment of fire safety of hotels. Three approaches to the calculation of “fire points” of hotels have been developed, based on the breakdown of hotels into classes and identification of the fire safety index of hotels within one class. The first scoring method is the Gretenner method used for calculating the integral fire safety index. The first and third quartiles are identified for the hotel statistics. Hotels, whose index does not exceed the first quartile, belong to the subgroup featuring a high level of fire safety; those ranging from the first (inclusively) to the third quartile belong to the medium level. If the values of the fire hazard index of hotels are not smaller than the third quartile, they belong to the subgroup that has a low level of fire safety. The second method is based on the use of a “safety reserve” in terms of evacuation time. The third model of assessing the fire hazard of hotels includes the breakdown of hotels into groups, identification of the value of individual fire risk, ranking hotels by the fire risk that varies from the lowest to the highest.

Results and their discussion. As for the classification of hotels, problems that accompany the consolidation of the physical approach to the fire hazard assessment with the expert method of scoring are solved by choosing the proportion between the points of the system and the “fire points” set by the adjustment coefficient. The fire points, assigned to the subgroups of hotels, are indicative and should be corrected within the framework of the proposed approach.

Conclusions. The experimental application of the developed methods using the cases of real hotel facilities will allow choosing the optimal engineering method of taking into account the fire safety of hotels in the process of their classification.

Keywords: fire safety; grouping of hotels; safety scores; fire points; adjustment coefficient

For citation: Prasadkov V.I., Konstantinova N.I., Muslakova S.V., Abashkin A.A. Classification of hotels taking into account fire risks. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):75-83. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.75-83 (rus).

✉ Svetlana Vitalyevna Muslakova, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Введение

Федеральный закон «Об основах туристической деятельности в Российской Федерации»¹ (далее — ФЗ-132) в рамках регулирования предоставления гостиничных услуг предусматривает обязательную классификацию гостиниц и запрещает эксплуатацию средств размещения людей без определения категории.

В Положении о классификации гостиниц² (далее — Положение) использован балльный механизм присвоения гостиницам одной из шести категорий.

Внедрение в практику положений указанных документов должно обеспечить: механизм выдачи, приостановление или прекращение действия свидетельств о присвоении гостиницам определенной категории; повышение информированности потребителей о качестве гостиничных услуг; повышение достоверности в рекламе гостиниц, а также содействовать аргументированной здоровой конкурентоспособности, стимулировать отельеров к повышению уровня безопасности объектов временного размещения людей. Все это должно обеспечить привлекательность гостиниц, способствовать развитию туризма в нашей стране, повышая доверие потребителя к качеству услуг.

К сожалению, действующие в России регламентирующие документы не содержат в явной форме положений, характеризующих элементы системы

обеспечения пожарной безопасности гостиниц для их учета в критериях категорированной оценки.

Также отсутствует интегральный показатель, объективно оценивающий уровень обеспечения пожарной безопасности гостиниц, что привлекает внимание ученых и практических специалистов в области пожарной безопасности гостиниц [1]. Причина такой ситуации может быть вызвана следующими обстоятельствами.

В Положении о классификации гостиниц² используется экспертный метод оценки объектов размещения, в результате применения которого определяются баллы по широкому ряду позиций фактического состояния гостиниц. Экспертная оценка и выдача свидетельства о присвоении категории гостиницы проводится аккредитованной организацией. Предусмотрено 6 категорий классификации гостиниц (п. 4 Положения).

Без наличия свидетельства о присвоении гостинице определенной категории ФЗ-132 запрещается предоставление гостиничных услуг.

В Положении² вопросы обеспечения пожарной безопасности нашли отражение только в части, касающейся наличия в номерах гостиниц планов эвакуации при пожаре (п. 43 Приложение 1), инструкций для проживающих о действиях в случае пожара (п. 44 Приложение 1), знаний и соблюдения персоналом гостиницы правил пожарной безопасности и инструкции о действиях в чрезвычайных ситуациях (п. 5 Приложение 6). В части IV (п. 15) Положения² изложен перечень документов и сведений, необходимых для осуществления классификации гостиниц. Указанный перечень не содержит требований о предоставлении документа о противопожарном

¹ Об основах туристической деятельности в Российской Федерации : Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ (в редакции от 08.06.2020).

² Об утверждении Положения о классификации гостиниц : Постановление Правительства РФ от 18 ноября 2020 г. № 1860.

состоянии объекта размещения (предписание государственного пожарного надзора или заключение о независимой оценке пожарного риска). А в п. 16, определяющем основания для отказа заявителю в осуществлении классификации гостиницы, отсутствует положение о несоответствии объекта требованиям действующих нормативных документов по пожарной безопасности.

Также в Приложениях 1 и 2 Положения не отражены критерии, определяющие безопасность проживающих в гостинице людей. Например, такие как: ограничение (исключение) использования в номерах легковоспламеняющихся текстильных материалов и изделий, установка противопожарных дверей в номерах, наличие в номерах индивидуальных средств защиты органов дыхания, наличие эффективной системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре и т.д. Приложения 4 и 5 не имеют критериев, отражающих вопросы обеспечения условий для эффективной работы спасательных подразделений в случае возникновения пожара, состояние путей эвакуации, соблюдение правил противопожарного режима, работоспособность всех противопожарных систем и др.

Целью настоящей статьи является разработка с учетом пожарных рисков методов, позволяющих определять уровень пожарной безопасности гостиниц также в баллах, соизмеримых с принятой системой оценок, для дальнейшего использования при присвоении гостиницам соответствующих категорий.

При существующей некоторой неопределенности в учете уровня пожарной безопасности гостиниц при их классификации предлагается внести изменения в Положение², установив единый показатель, характеризующий пожарную безопасность объектов размещения, взяв за основу, в соответствии с Федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»³ (далее — Ф3-123), безопасность людей в условиях риска возникновения пожара. Такой показатель должен учитывать объемно-планировочные и конструктивные решения гостиниц, наличие инженерных средств противопожарной защиты, оборудование номеров, количество, размещение и физическое состояние людей в здании.

Для достижения поставленной цели разработаны три подхода к расчету «пожарных баллов» для гостиниц. На основе изложенных ниже методик, по величине интегрального показателя могут быть рассчитаны «пожарные баллы», которые предлагается использовать для корректировки принятой в настоящее время системы балльной оценки с целью учета уровня обеспечения пожарной безопасности гостиниц.

³ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

Теоретические основы методов балльной оценки пожарной безопасности гостиниц

Предлагается сгруппировать гостиницы в кластеры по следующим факторам:

- по видам гостиниц (согласно п. 5 Положения²);
- по количеству гостей (менее 50 человек и более 50 человек);
- по степени огнестойкости здания.

То есть гостиницы могут относиться к одной из $N = 2 \times 6 \times 5 = 60$ групп.

Ниже представлены разработанные методы (модели) для определения интегрального показателя пожарной безопасности гостиниц.

Оценка интегрального показателя методом Гретенера

Метод Гретенера (индексный метод), разработанный для решения задач в области страхования, получил широкое применение и в пожарном деле [2–4]. Преимущество индексного метода заключается в возможности использования относительно небольшого количества входных факторов, существенно влияющих на пожарную опасность (безопасность) объектов.

В этом состоит сложность задачи, так как выбор и ранжирование входных факторов, учет определенных критериев проводится экспертным путем. Одновременно входные факторы не должны в значительной степени коррелировать между собой, зависеть от одного общего показателя, не входящего в формулу, например от объемов финансирования на противопожарную защиту объекта.

В данном случае задача несколько упрощается, так как интегральный показатель не учитывает финансовые затраты на систему пожарной безопасности, прямой материальный ущерб и косвенные экономические потери при пожаре.

Впервые индексный метод Гретенера для оценки пожарной безопасности гостиниц на основе интегрального показателя с целью классификации гостиниц был предложен в 2020 году [4], при этом в качестве входных факторов для оценки интегрального показателя были использованы следующие:

- показатель загруженности гостиницы посетителями;
- превышение площади пожарного отсека нормативных значений;
- этажность здания;
- наличие автоматических систем пожаротушения;
- количество эвакуационных выходов из здания;
- время подачи первого ствола;
- тип системы оповещения о пожаре и управления эвакуацией (СОУЭ);
- степень огнестойкости здания.

Анализ, предложенный в работе [4] формулы (1) для оценки показателя пожарной опасности с точки зрения учета исходных данных по объекту и современного аппарата оценки рисков, показывает возможность улучшения ранее предложенной формулы. Ниже приводится модифицированная формула для оценки показателя пожарной опасности гостиниц в виде:

$$G = \frac{\bar{S} \cdot \bar{t}}{A \cdot B \cdot T(6 - C)}, \quad (1)$$

где

$$\bar{S} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=M} \frac{S_i}{S_{н,i}}, \quad (2)$$

$$\bar{t} = t_{\phi} / t_{н}, \quad (3)$$

M — количество пожарных отсеков в здании гостиницы;

S_i — площадь i -го пожарного отсека в здании, m^2 ;

$S_{н,i}$ — нормативная площадь пожарного отсека, m^2 , определяемая по СП 2.13130.2020⁴;

t_{ϕ} — расчетное время подачи первого ствола, мин;

$t_{н}$ — нормативное время подачи первого ствола, мин;

A — параметр, характеризующий автоматическую систему пожаротушения (АУП) в гостинице;

$A = 3$ — в гостинице установлена спринклерная система пожаротушения;

$A = 5$ — в гостинице установлена автоматическая установка пожаротушения с принудительным пуском;

$A = 1$ — отсутствие в гостинице АУП;

B — принимает значения, равные номеру типа системы оповещения о пожаре и управления эвакуацией (СОУЭ) по СП 3.13130.2009⁵;

$$T = \sum_{i=1}^{i=L} \frac{0,8 t_{\text{бл},i} - t_{\text{эв},i}}{t_{\text{нэ}}} \cdot \frac{1}{L}, \quad (4)$$

где $t_{\text{бл},i}$ — время блокирования опасными факторами пожара i -го эвакуационного выхода, мин;

$t_{\text{эв},i}$ — время эвакуации людей для i -го выхода, мин;

$t_{\text{нэ}}$ — время начала эвакуации людей, мин, по Методике определения расчетных величин пожарного риска⁶ (далее — Методика);

⁴ СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

⁵ СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности.

⁶ Методика определения расчетных величин пожарного риска

L — количество основных эвакуационных выходов, ведущих из здания наружу. Например, на эксплуатируемую кровлю, оборудованную эвакуационными выходами на уровень земли;

C — 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно степеням огнестойкости I, II, III, IV и V.

Для простоты изложения в формуле (4) не учтены факторы: возможность возникновения скоплений людей на путях эвакуации и случаи, при которых $0,8 t_{\text{бл},i} < t_{\text{эв},i}$, что может быть достаточно просто учтено в формуле (1).

Для гостиниц, относящихся к определенной группе, рассчитываются G_j , где j — номер гостиницы в группе, $j = 1 \dots N$; N — количество гостиниц в группе.

Структура интегрального показателя G по формуле (1) не учитывает в явной форме площадь гостиниц, количество гостей в гостинице. Эти факторы нивелированы за счет разделения гостиниц по группам. И в пределах групп будет проведено сравнение и оценка гостиниц по показателям пожарной опасности. Далее для каждой группы строится распределение гостиниц по величине показателя G_j (от наименьшего G_1 к наибольшему G_N).

Интегральный показатель характеризует пожарную опасность гостиницы, и его увеличение соответствует росту пожарной опасности объекта

Используя первый и третий квартили, разделим анализируемую группу гостиниц на три подгруппы. Для статистики G_j определяются первый квартиль G_{K25} , третий квартиль G_{K75} [5].

Гостиницу можно отнести:

- к высокому уровню безопасности при условии $G_j < G_{K25}$;
- к среднему уровню пожарной безопасности с показателями G_j в диапазоне $G_{K25} \leq G_j < G_{K75}$;
- к низкому уровню пожарной безопасности в диапазоне $G_j \geq G_{K75}$.

Для учета пожарной безопасности гостиниц в системе балльной оценки по Положению² предлагается присваивать гостиницам следующие значения баллов:

- при высоком уровне пожарной безопасности — 10 баллов;
- при среднем уровне пожарной безопасности — 5 баллов;
- при низком уровне пожарной безопасности — 0 баллов.

При этом необходимо ввести корректирующий коэффициент K , связывающий принятую в Положении² систему классификации гостиниц с предлагаемой

в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утверждена приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382 (с изменениями, внесенными приказами МЧС России № 749 от 12.12.2011 и № 632 от 02.12.2015).

балльной оценкой уровня пожарной безопасности. Значение коэффициента K должно быть установлено совместно организациями туризма и МЧС России с учетом социальной значимости объектов и отражать влияние уровня пожарной безопасности объекта размещения на общую оценку гостиницы.

Пороговые значения квартилей G_{K25} и G_{K75} будут уточняться по мере накопления статистических данных результатов оценки интегральных показателей пожарной опасности гостиниц.

Указанные выше значения «пожарных баллов» для подгрупп гостиниц следует рассматривать как первое приближение и в дальнейшем должны быть уточнены.

При установлении величины приемлемого уровня пожарной опасности значения интегрального показателя для каждой из гостиниц не должны превышать предельного значения показателя G_j [6, 7].

Оценка пожарной безопасности гостиниц на основе доступного времени эвакуации

В последние годы в научно-прикладной литературе обсуждаются вопросы оценки пожарной безопасности объектов на основе расчета и сравнения необходимого $t_{нб}$ и требуемого $t_{тр}$ времени эвакуации [8–12]. Запас по времени, равный $(t_{нб} - t_{тр})$, является «запасом прочности (безопасности)». В зарубежной литературе время $t_{нб}$ называется «available save egress time» (располагаемое (необходимое) время безопасной эвакуации) и $t_{тр}$ «required save egress time» (требуемое время эвакуации).

Согласно статье 53 ФЗ-123, безопасная эвакуация людей при пожаре обеспечивается, если время эвакуации $t_{эв}$ ($t_{тр}$) не превышает необходимого времени эвакуации $t_{нб}$ ($t_{бл}$), т.е.:

$$t_{эв} < 0,8t_{бл}. \quad (5)$$

Коэффициент 0,8 в формуле (5) учитывает возможные разбросы в определении времени от начала пожара до блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

Время эвакуации $t_{эв} = t_p + t_{нэ}$, где t_p — расчетное время эвакуации; $t_{нэ}$ — время начала эвакуации по Методике⁶.

В рассматриваемом случае показатель пожарной опасности гостиниц предлагается оценивать следующим образом.

На основе сценариев пожара для объекта устанавливается схема путей эвакуации в здании, на которых выделяются представительные точки. В качестве представительных точек выбираются выходы из основных помещений, эвакуационных коридоров, входы в лестничные клетки, выходы

из лестничных клеток, эвакуационные выходы наружу из здания и т.д.

Пронумеруем соответствующие точки: B_{ij} , где i — номер сценария, j — номер точки. Максимальные номера j зависят в общем случае от номера сценария.

Для каждой точки j определяется запас безопасности T_j :

$$T_j = 0,8t_{бл} - (t_{нэ} + t_p),$$

где $t_{бл}$ — время блокирования опасными факторами пожара эвакуационного пути в точке (окрестности точки) j ;

$t_{нэ}$ — время начала эвакуации, мин;

t_p — время эвакуации, мин.

Для всех точек j в сценарии i определяется количество людей, N_{ij} — заблокированных в точке j , т.е. для которых выполняется условие:

$$0,8t_{бл} < t_{нэ} + t_p,$$

а также которые попадают в условия скопления людей на участках пути со временем скопления больше 6 минут (плотность людского потока на пути эвакуации превышает значение $0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$).

Далее определяется количество людей, не успевших эвакуироваться из здания при i -м сценарии:

$$N_{неэв,i} = \sum_j N_{ij}. \quad (6)$$

Затем оценивается вероятность эвакуации $P_{эi}$ из здания при i -м сценарии пожара:

$$P_{эi} = \frac{N_{\Sigma i} - N_{неэв,i}}{N_{\Sigma i}}, \quad (7)$$

где $N_{\Sigma i}$ — количество людей в здании (пожарном отсеке) при i -м сценарии пожара.

Далее определяется вероятность эвакуации людей из здания:

$$P_э = \min P_{эi}. \quad (8)$$

При этом расчет характеристик $t_{бл}$, $t_{нэ}$, t_n проводится по Методике⁶ с учетом параметров системы пожарной безопасности гостиниц.

С увеличением $P_э$ возрастает пожарная безопасность гостиниц. В случае наличия детальных данных по структуре состава потока эвакуирующихся людей методика расчета и исходные данные могут быть уточнены согласно [13–16].

В результате определяется некоторая статистика гостиниц по исследуемой группе. Ранжируем гостиницы по значению вероятности успешной эвакуации людей из здания гостиницы. От гостиницы с максимальным значением вероятности эвакуации

$P_{\Sigma 1}$ до гостиницы с минимальным значением вероятности эвакуации $P_{\Sigma N}$, где N — количество гостиниц в группе. Обозначим первый квартиль статистики P_{K25} , третий квартиль — P_{K75} .

Разделим все гостиницы на три подгруппы. В первую подгруппу войдут гостиницы, вероятность эвакуации из которых превышает величину первого квартиля P_{K25} , во вторую — гостиницы, вероятность эвакуации из которых изменяется в пределах от P_{K25} (включительно) до величины третьего квартиля P_{K75} . В третью подгруппу входят гостиницы, вероятность эвакуации из которых изменяется в пределах от P_{K75} (включительно) до величины $P_{\Sigma N}$.

Гостиницы, вошедшие в первую подгруппу, можно отнести к гостиницам с высоким уровнем пожарной безопасности. Во вторую подгруппу — со средним уровнем. В третью подгруппу войдут гостиницы с низким уровнем пожарной безопасности.

Для учета пожарной безопасности гостиниц по принятой в Положении² системе классификации предлагается присвоить гостиницам следующие значения баллов:

- для первой подгруппы — 10 баллов;
- для второй подгруппы — 5 баллов;
- для третьей подгруппы — 0 баллов.

Указанные значения «пожарных баллов» предлагается скорректировать путем умножения их на коэффициент K , учитывающий связь между баллами по пожарной безопасности и принятыми в Положении².

Изложенная выше вторая модель позволяет учесть достаточно детально объемно-планировочные и конструктивные решения гостиницы, инженерные средства противопожарной защиты объектов, включая тип системы оповещения и управления эвакуацией [17–20].

Модель балльной оценки пожарной опасности гостиниц на основе расчетов пожарного риска

Предлагается третья модель оценки пожарной опасности гостиниц с использованием баллов, включающая следующие основные положения.

1. Деление гостиниц на группы.

2. Определение величины пожарного риска R_i для каждой гостиницы по Методике⁶.

3. Упорядочивание гостиниц по величине пожарного риска от наибольшего значения к наименьшему. Определение первого квартиля R_{K25} и третьего квартиля R_{K75} для статистики пожарных рисков.

4. Деление рассматриваемой группы гостиниц на три подгруппы соответственно:

- величина пожарного риска $R_i < R_{K25}$;
- величина пожарного риска находится в пределах от R_{K25} включительно до R_{K75} ;

- величина пожарного риска не меньше чем R_{K75} .
5. Присвоение гостиницам «пожарных баллов» 10, 5 и 0 по подгруппам.

6. Умножение «пожарных баллов» на коэффициент перехода K для использования полученных оценок в принятой системе классификации гостиниц.

Предложенный подход соответствует идеологии развиваемого в мире с конца XX в. гибкого нормирования при проектировании объектов различного функционального назначения [15–17].

Результаты и их обсуждение

Разработаны теоретические основы балльной оценки пожарной опасности гостиниц для их включения в принятую систему классификации гостиниц на основе балльных оценок.

Предложенные методы балльной оценки пожарной опасности гостиниц основаны:

- на учете основных факторов пожарной опасности гостиниц в рамках индексного метода Грегенера (первый метод);
- на оценках времени безопасности и вероятности эвакуации людей при пожаре из гостиниц (второй метод);
- на оценке индивидуальных пожарных рисков гостиниц для людей в гостиницах (третий метод).

Второй и третий методы отражают непосредственно физические причины пожарной опасности.

Сложности соединения физического подхода к оценке пожарной опасности с экспертным методом балльной оценки при классификации гостиниц решаются за счет выбора пропорции между баллами используемой системы и «пожарными баллами», задаваемой коэффициентом K .

Присваиваемые подгруппам гостиниц «пожарные баллы» 10, 5, 0 на текущей стадии исследования имеют ориентировочный характер и должны быть уточнены по результатам апробации представленных моделей.

В настоящее время для практического использования практически подготовлен третий метод, так как его внедрение потребует минимальную программную доработку. Также применение указанного метода позволяет уточнить на практике детали его использования и одновременно повышает актуальность проверки эффективности первого и второго методов.

Выводы

Опытное применение разработанных методов для оценки пожарной опасности гостиниц в реальных условиях их функционирования позволит выбрать инженерный метод учета уровня пожарной безопасности объектов временного размещения людей при их классификации.

Изложенные выше предложения не исключают выполнение требований по обеспечению безопасности людей при пожарах в гостиницах на уровне требований ФЗ-123.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Груздь С.И. Положение не из легких // Безопасность индустрии туризма/The security of the tourism industry. 2019. № 2 (05). С. 54–55.
2. Gretener M. Versuch zur rechnerischen Bestimmung der Brandgefahrung von Industrie — und Objekten. Internationales Brandschutzseminar: (3 Kongress) Eindhoven. 1968. Pp. 34–38.
3. Власов А.А. Сравнительный анализ применения индексных методов анализа пожарного риска // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2014. № 3. С. 58–61.
4. Присадков В.И., Мушлакова С.В., Ушаков Д.В., Присадков К.В. Оценка пожарной безопасности гостиниц и их «звездная» классификация // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 15 октября 2020 г. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 387–389. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44196543>
5. Тимохин А. Определение процентеля в статистике и как его определять. URL: <https://recture.ru/How/opredelenie-protsentilya-v-statistike-i-kak-ego-vychislit/> (дата обращения: 21.07.2021).
6. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. Note Explicative de Protection Incendie. 2007. VKF/AEAI, 115-03f.
7. Cluzel D., Sarrat P. Methode ERIC. Evaluation du Risque Incendie par le Calcul // Proc. CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings. 1979. Vol. I. Pp. II/37–II/58.
8. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 115. P. 103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
9. Lovreglio R., Kuligowski E., Gwynne S., Boyce K. A pre-evacuation database for use in egress simulations // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 105. Pp. 107–128. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.12.009
10. Schröder B. Multivariate methods for life safety analysis in case of fire: Ph. D. thesis. Universitätsbibliothek Wuppertal. 2017; 245.
11. NFPA 101A. Alternative approaches to life safety. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2001.
12. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.
13. Холщевников В.В. Гносеология людских потоков: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
14. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent — based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET // Fire Safety Journal. 2022. No. 127. P. 103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
15. Kuligowski E.D. Computer evacuation models for buildings // SEPE Handbook of Fire Protection Engineering. M.J. Hurley, D.T. Cottuk, J.R. Hall, K. Hazada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky et al. (eds). New York : Springer, 2016. Pp. 2152–2180. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0-60
16. Присадков В.И., Абашкин А.А., Мушлакова С.В., Усолкин С.В., Присадков К.В. Гибкое нормирование объемно-планировочных решений зальных помещений // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : мат. III Всеросс. науч.-практ. конф. Железнодорожск, 23 апреля 2021 г. Железнодорожск : Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. С. 171–177.
17. National Fire Protection Association: Life Safety Code NFPA101. Edition. National Fire Protection Association. Quincy, MA, 2021.
18. German Institute for Standardization (ed). Fire Safety Engineering. Part 1: Basic Principles and Codes of Practice. DIN, Berlin, 2016. DIN 18009–1.
19. Присадков В.И., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Зуева А.А. Экраны вокруг проемов в перекрытиях общественных зданий // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 32–41. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.32-41
20. Hurley M.J., Rosenbaum E.R. Performance — based design. SEPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed. Society of Fire Protection Engineers. M. Hurley (ed). 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_37

REFERENCES

1. Gruzd S.I. The situation is not easy. *Bezopasnost v industrii turizma/The Security of the Tourism Industry*. 2019; 2(05):54-55. (rus).
2. Gretener M. Versuch zur rechnerischen Bestimmung der Brandgefahr von Industrie — und Objekten. *Internationales Brandschutzseminar: (3 Kongress) Eindhoven*. 1968; 34-38.
3. Vlasov A.A. Comparative analysis of application of index methods of the analysis of fire risk. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2014; 3:58-61. (rus).
4. Prisdakov V.I., Muslakova S.V., Ushakov D.V., Prisdakov K.V. Fire safety assessment of hotels and their “star” classification. *Modern fireproof materials and technologies: a collection of materials of the IV International scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Ivanovo, October 15, 2020*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020; 387-389. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44196543> (rus).
5. Timokhin A. *Definitions of percentile in statistics and how to determine it*. URL: <https://recture.ru/How/opredelenie-protsentilya-v-statistike-i-kak-ego-vychislit/> (accessed: July 21, 2021).(rus).
6. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. *Note Explicative de Protection Incendie*. 2007. VKF/AEAI, doc. 115-03f.
7. Cluzel D., Sarrat P. Methode ERIC. Evaluation du Risque Incendie par le Calcul. *Proc. CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings*. 1979; I: II/37–II/58.
8. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*. 2020; 115:103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
9. Lovreglio R., Kuligowski E., Gwynne S., Boyce K. A pre-evacuation database for use in egress simulations. *Fire Safety Journal*. 2019; 105:107-128. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.12.009
10. Schröder B. *Multivariate methods for life safety analysis in case of fire: Ph. D. thesis*. Universitätsbibliothek Wuppertal, 2017; 245.
11. *NFPA 101A. Alternative approaches to life safety*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2001.
12. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evacuation and behavior of people in case of fires*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2009; 212. (rus).
13. Kholshchevnikov V.V. *Epistemology of human flows: monograph*. Moscow. Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2019; 592. (rus).
14. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent — based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET. *Fire Safety Journal*. 2022; 127:103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
15. Kuligowski E.D. Computer evacuation models for buildings. *SEPE Handbook of Fire Protection Engineering*. M.J. Hurley, D.T. Cottuk, J.R. Hall, K. Hazada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky et al. (eds). New York, Springer, 2016; 2152-2180. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0-60
16. Prisdakov V.I., Abashkin A.A., Muslakova S.V., Usolkin S.V., Prisdakov K.V. Flexible rationing of space-planning solutions of utility rooms. *Actual problems of fire safety and protection from emergencies : Materials of the III All-Russian scientific and practical conference. Zheleznogorsk, April 23, 2021*. Zheleznogorsk, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2021; 171-177. (rus).
17. National Fire Protection Association: Life Safety Code NFPA101. Edition. *National Fire Protection Association*. Quincy, MA, 2021.
18. German Institute for Standardization (ed). *Fire Safety Engineering*. Part 1: Basic Principles and Codes of Practice. DIN, Berlin, 2016. DIN 18009-1.
19. Prisdakov V.I., Ushakov D.V., Abashkin A.A., Zueva A.A. Screens surrounding openings in floor slabs of public buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):32-41. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.32-41 (rus).
21. Hurley M.J., Rosenbaum E.R. Performance — based design. *SEPE Handbook of Fire Protection Engineering*, fifth ed. *Society of Fire Protection Engineers*. M. Hurley (ed). 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_37

Поступила 21.03.2022, после доработки 12.04.2022;

принята к публикации 18.05.2022

Received March 21, 2022; Received in revised form April 12, 2022;

Accepted May 18, 2022

Информация об авторах

ПРИСАДКОВ Владимир Иванович, 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, д. 12; РИНЦ ID: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12; РИНЦ ID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

МУСЛАКОВА Светлана Витальевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник 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, д. 12; РИНЦ ID: 390333; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.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, д. 12; РИНЦ ID: 1118056; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vladimir I. PRISADKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

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

Svetlana V. MUSLAKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, 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: 390333; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

Aleksandr A. ABASHKIN, Head of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, 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: 1118056; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@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.

Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре

Андрей Владимирович Пехотиков¹, Роман Анатольевич Иващук²,
Александр Васильевич Гомозов¹✉, Сергей Алексеевич Лучкин¹

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

² ООО «Желдорпроект», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для формирования современных нормативных требований по обеспечению огнестойкости строительных конструкций в условиях пожара, разработки научно-обоснованных решений по противопожарной защите зданий и сооружений в случае вынужденных отступлений от требований нормативных документов в части огнестойкости, обоснования возможности строительства зданий и сооружений с ненормируемыми пределами огнестойкости на основе современных конструктивных систем и т.д. необходима разработка методологических положений, позволяющих оценить влияние фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей при их эвакуации и спасении с учетом состава и функциональных характеристик иных систем противопожарной защиты.

Целью статьи является разработка методологических положений и математических соотношений, позволяющих оценить влияние пределов огнестойкости строительных конструкций как на возможность безопасной эвакуации из зданий, так и на возможность их безопасного спасения.

Методы. Используются аналитический и математический методы, позволяющие оценить совместное влияние динамики изменения опасных факторов пожара на путях эвакуации, в помещении с нахождением человека, ожидающего спасения пожарными подразделениями, а также на путях перемещения этого человека пожарными подразделениями, в сочетании с оценкой времени потери огнестойкости конструкций, которые определяют возможность безопасной эвакуации и спасения людей.

Результаты. Разработаны теоретические положения, позволяющие учесть влияние фактора огнестойкости строительных конструкций зданий на безопасность находящихся в здании людей при пожаре.

Выводы. На основе исследований проведена разработка общих методологических положений и математических соотношений, позволяющих определить количественные соотношения между степенью огнестойкости здания, пределами огнестойкости его строительных конструкций, временем прибытия пожарных подразделений, типом системы оповещения и управления эвакуации и возможностью безопасной эвакуации и безопасного спасения находящихся в этом здании людей.

Ключевые слова: пожарная безопасность; предел огнестойкости; удельное сопротивление дымопроницанию; эквивалентная продолжительность пожара; эвакуация; спасение людей при пожаре; предельные значения опасных факторов пожара

Для цитирования: Пехотиков А.В., Иващук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 84–95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95

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

Analyzing the influence of the fire resistance of building structures on human safety in case of a fire

Andrey V. Pekhotikov¹, Roman A. Ivashchuk², Alexander V. Gomozov¹✉,
Sergey Alekseevich Luchkin¹

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

² Zheldorproekt LLC, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Methodological provisions must be developed to evaluate the impact of the fire resistance factor of building structures on human safety during evacuation and rescue with account taken of the composition and

functional characteristics of other fire safety systems to formulate modern regulatory requirements for the fire resistance of building structures under fire conditions, develop science-based solutions for the fire safety of buildings and structures in case of forced deviations from the fire resistance requirements set in regulatory documents, and justify the construction of buildings and structures, based on modern structural systems, having non-standard fire resistance limits, etc.

The purpose of the article is to develop general methodological provisions and mathematical relationships that allow evaluating the impact of the fire resistance limits of building structures both on safe evacuation and safe rescue from buildings.

Methods. Analytical and mathematical methods are used to evaluate the combined effect of changes in the fire hazard arising along the evacuation routes, in a room with a person waiting to be rescued by fire departments, as well as along the routes taken by fire departments carrying this person out, in combination with the evaluated time span needed for the structure to lose its fire resistance. The value of this time span is used to identify the time available for the safe evacuation and rescue of people.

Results. Theoretical provisions have been developed to take into account the influence of the fire resistance factor of building constructions on the safety of people in a building in case of a fire.

Conclusions. The research findings were contributed to the general methodological provisions and mathematical relationships needed to determine the quantitative relationships between the extent of fire resistance of a building, fire resistance limits of building structures, the time of arrival of fire departments, types of fire alarm and evacuation control systems, and the possibility of safe evacuation and rescue of people from a building.

Keywords: fire safety; fire resistance limit; specific resistance to smoke penetration; equivalent fire duration; evacuation; rescue of people in case of a fire; limit values of fire hazards

For citation: Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomofov 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; 31(3):84-95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95 (rus).

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

Введение

Безопасность людей в условиях пожара обеспечивается возможностью их эвакуации и спасения. Положениями ст. 53 Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ) [1] предусматривается, что каждое здание или сооружение должно иметь объемно-планировочное решение и конструктивное исполнение эвакуационных путей, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей при пожаре. При этом требование о необходимости учета конструктивного исполнения эвакуационных путей предполагает, что при оценке безопасности эвакуации необходимо учитывать фактор поведения конструкций при пожаре, т.е. их огнестойкость (сопутствующее проявление опасных факторов пожара).

Эффективность систем противопожарной защиты по обеспечению безопасной эвакуации людей в настоящее время оценивается на основе расчетов пожарного риска, выполняемых по Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности [2]. При этом данная методика не учитывает влияние фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность эвакуации людей, который играет существенную роль в зданиях IV и V степеней огнестойкости, тентовых сооружениях, навесах, сооружениях без систем оповещения при пожаре и т.д.

В ряде случаев безопасность людей в условиях пожара обеспечивается на основе их спасения [3], а также на основе комплекса действий по эвакуации

и спасению (например, самостоятельное движение людей в безопасную зону, которое является эвакуацией, а их дальнейшее перемещение наружу пожарными подразделениями — спасением). С учетом этого в ст. 80 № 123-ФЗ указывается, что конструктивные, объемно-планировочные и инженерно-технические решения зданий и сооружений должны обеспечивать в случае пожара возможность не только эвакуации людей в безопасную зону до нанесения вреда их жизни и здоровью вследствие воздействия опасных факторов пожара (ОФП), но и проведения мероприятий по спасению людей [1].

Следует учитывать, что спасение людей должно быть обеспечено для немобильных групп населения [3] в жилых зданиях и больницах, детей в родильных домах и дошкольных образовательных организациях, жильцов многоквартирных жилых зданий, не оборудованных системами оповещения о пожаре (СОУЭ), а также при отказах этих систем в любых зданиях.

С учетом вышесказанного целью настоящей статьи является разработка научных положений, позволяющих оценить влияние фактора огнестойкости строительных конструкций как на возможность безопасной эвакуации людей из зданий, так и на возможность их безопасного спасения.

Для достижения указанной цели в рамках статьи предусмотрена разработка общих методологических положений и математических соотношений, позволяющих оценить влияние пределов огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей в случае их эвакуации и спасения при пожаре в соче-

тании с анализом временных интервалов развития опасных факторов пожара, эвакуации людей, перемещения пожарных подразделений к спасаемому человеку и его спасению.

Кроме того, для оценки эффективности практического применения разработанных методологических положений в статье предусмотрен анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей в жилых зданиях IV и V степеней огнестойкости.

Общие методологические положения

Для оценки влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей при пожаре необходимо учитывать как необходимость обеспечения безопасности людей при эвакуации, так и необходимость обеспечения безопасности людей при спасении. Безопасность людей при эвакуации считается обеспеченной при выполнении следующих основных условий:

- опасные факторы пожара на всем пути эвакуации людей до выхода наружу или в безопасную зону не превышают предельно допустимых значений, а интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в безопасную зону не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре;
- в течение всего времени эвакуации не происходит потеря огнестойкости (т.е. достижения предельных состояний по огнестойкости) тех конструкций, которые влияют на безопасность эвакуации людей.

Перечисленные выше положения применительно к безопасности людей при эвакуации описываются соотношениями:

$$0,8 t_6 \geq t_{н.з} + t_p, \quad (1)$$

где t_6 — время блокирования путей эвакуации, определяемое на основе математических моделей распространения пожара между помещениями внутри здания с использованием соответствующих программных средств согласно [2, 4–9] путем расчета минимального критического времени от начала пожара до момента достижения в помещении или на путях эвакуации ОФП, имеющих предельно допустимые для людей значения [2, 10–12], а также времени достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара $t_{огн}$ (время потери огнестойкости):

$$t_{6,кор} = \min\{t_{кр}^{п.в}, t_{кр}^T, t_{кр}^{т.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{т.п}, t_{огн}\}, \quad (2)$$

$t_{н.з}$ и t_p — время начала эвакуации и расчетное время эвакуации, определяемые согласно [2].

Безопасность людей при спасении считается обеспеченной при выполнении следующих основных условий:

- опасные факторы пожара в помещении с людьми, ожидающими спасения пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента начала спасения (в том числе с учетом средств защиты, находящихся на объекте и используемых этими людьми), а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность людей в этой зоне;
- опасные факторы пожара в зоне перемещения людей, спасаемых пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента окончания их перемещения наружу (в том числе с учетом средств защиты, используемых этими людьми или переданных им пожарными), а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность перемещения людей наружу.

Перечисленные выше положения применительно к безопасности спасаемых людей описываются соотношениями:

$$0,8 t_{6,пом} \geq T_{н.сп}, \quad (3)$$

$$0,8 t_{6,пер} \geq T_{о.сп}, \quad (4)$$

где $t_{6,пом}$, $t_{6,пер}$ — время блокирования помещения, в котором расположен спасаемый человек, и путей его перемещения при спасении; $T_{н.сп}$ — время начала спасения, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента прибытия к спасаемому человеку подразделений пожарной охраны; $T_{о.сп}$ — время окончания спасения человека из здания, осуществляемого подразделениями пожарной охраны, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента перемещения спасаемого на безопасное расстояние от горящего здания.

Время блокирования помещения $t_{6,пом}$ и путей перемещения $t_{6,пер}$ определяется на основе математических моделей распространения пожара внутри и снаружи здания, в том числе через щели закрытых дверей помещений, в которых находится человек, согласно [13–17] путем расчета минимального критического времени от начала пожара до момента достижения в помещении или на путях перемещения ОФП, имеющих предельно допустимые для людей значения, а также времени достижения предельных состояний по огнестойкости строительных

конструкций при свободном развитии пожара $t_{огн}$ (время потери огнестойкости):

$$t_{б.пом/пер} = \min\{t_{кр}^{п.в}, t_{кр}^T, t_{кр}^{т.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{т.п}, t_{огн}\}. \quad (5)$$

В случае, если перемещение спасаемого человека осуществляется по путям эвакуации, а дополнительная защита человека от ОФП не предусмотрена, то $t_{б.пер} = t_{бл}$.

Время начала спасения определяется по формуле:

$$T_{н.сп} = t_c + t_{пр} + t_{пер}, \quad (6)$$

где t_c — время от момента начала пожара до сообщения о нем в подразделение пожарной охраны;

$t_{пр}$ — время от момента сообщения о пожаре до момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию, определяемое в соответствии с положениями ч. 1 ст. 76 [1];

$t_{пер}$ — время от момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию до момента окончания перемещения к спасаемому человеку.

Время окончания спасения определяется по формуле:

$$T_{о.сп} = T_{н.сп} + t_{спл} + t_{пер}^*, \quad (7)$$

где $t_{спл}$ — время подготовки к спасению;

$t_{пер}^*$ — время перемещения спасаемого наружу, на безопасное расстояние от горящего здания.

Для обеспечения безопасности спасаемого человека должна быть обеспечена безопасность пожарных подразделений, осуществляющих действия по спасению людей, т.е. выполнены следующие основные условия:

- опасные факторы пожара на всех путях перемещения пожарных подразделений не превышают предельно допустимых для пожарных значений, в том числе с учетом использования ими средств защиты от ОФП;
- на путях перемещения пожарных подразделений (к спасаемому человеку и при его перемещении наружу) не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность этого перемещения. При этом необходимо учитывать, что маршруты перемещения пожарных к спасаемому человеку и перемещения с ним наружу могут не совпадать.

Перечисленные выше положения применительно к безопасности пожарных подразделений описываются соотношением:

$$0,8t_{б.пер}^{пож} \geq T_{о.сп}. \quad (8)$$

Значение времени блокирования путей перемещения пожарных подразделений $t_{б.пер}^{пож}$ определяется аналогично $t_{б.пер}$ на основе определения мини-

мального времени от начала пожара до момента наступления на путях их перемещения предельных для пожарных подразделений значений ОФП, а также времени достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара $t_{огн}$ для всех участков перемещения пожарных (сначала к спасаемому человеку и далее — до перемещения его наружу в момент $T_{о.сп}$):

$$t_{б.пер}^{пож} = \min\{t_{пож}^{п.в}, t_{пож}^T, t_{пож}^{т.г}, t_{пож}^{O_2}, t_{пож}^{т.п}, t_{огн}\}, \quad (9)$$

где $t_{пож}^{п.в}$, $t_{пож}^T$, $t_{пож}^{т.г}$, $t_{пож}^{O_2}$, $t_{пож}^{т.п}$ — время достижения предельно-допустимого значения по каждому из опасных факторов пожара (потере видимости, температуре, концентрации токсичных продуктов горения, концентрации кислорода, тепловому потоку) для пожарных, определяемое на основе предельно допустимых значений ОФП для пожарных. При этом принимается, что использование пожарными защитной одежды и средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения позволяет не учитывать воздействие на них токсичных продуктов горения и пониженной концентрации кислорода, однако температура в зоне действий пожарных не должна быть выше 90 °С.

Время достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара $t_{огн}$ (время от начала пожара до момента потери огнестойкости) определяется на основе расчета теплового воздействия пожара на строительные конструкции с учетом нагрузок, приложенных к этим конструкциям, или на основе данных об эквивалентной продолжительности пожара, изложенных в [18–20].

При этом в обязательном порядке определяется время от начала пожара до момента потери огнестойкости несущих элементов здания, а также конструкций, отделяющих горящее помещение от путей эвакуации (коридоров, лестничных клеток и т.д.), конструкций, отделяющих помещение с очагом пожара от помещения, в котором находится спасаемый человек, а также конструкций, отделяющих горящее помещение от путей перемещения пожарных от горящего помещения.

Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей в жилом здании IV степени огнестойкости

В качестве примера практического применения разработанных методологических положений проанализирован пожар в двухэтажном секционном жилом здании, схема этажа которого показана

на рис. 1. Здание имеет IV степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности С0 и защищено системой пожарной сигнализации (СПС) и СОУЭ. Очаг пожара находится на 2-м этаже в помещении 1 площадью 16 м² с проемностью $\Pi = 0,15 \text{ м}^{0,5}$. Анализируется возможность безопасной эвакуации и спасения людей (в том числе немобильного человека) из квартиры 3.

При пожаре жильцы в квартире 1 эвакуировались через коридор 2 в лестничную клетку за время не более $t_{31} = t_{p1} + t_{н.э1} \leq 1,5$ мин.

Если квартирная дверь не является противопожарной, то она должна приниматься открытой и коридор будет заполняться продуктами горения. Далее продукты горения будут распространяться в квартиру 3 через щели закрытой квартирной двери. Для расчета динамики распространения пожара между помещениями через открытые проемы использованы положения [2], а для расчета распространения пожара через дверные щели закрытой двери квартиры 3 — положения [13–15]. При этом величина удельного сопротивления дымопроницанию принималась равной $S = 5500 \text{ м}^3/\text{кг}$ согласно [21].

Проведенные расчеты показывают, что уже через 200 с от начала пожара в коридоре (помещение 2) граница задымленной зоны достигает уровня 1,7 м относительно пола (рис. 2), при этом значения оптической плотности дыма и концентрация HCL в задымленной зоне уже существенно превышают предельно допустимые значения (рис. 4, 6).

Для расчета времени блокирования коридора 2 проведем оценку времени достижения предельного состояния по огнестойкости $t_{огн}$ для несущих элементов здания (перекрытие помещения 1), а также для всех строительных конструкций, которые отделяют помещение очага пожара от путей эвакуации — межквартирной стены, которая отделяет помещение с очагом пожара от квартиры, в которой исходно расположен эвакуирующийся, стены между горящей квартирой и коридором, а также для внутренней стены лестничной клетки. Согласно требованиям [22, 23] данные конструкции имеют предел огнестойкости REI 30, REI 15 и REI 45 соответственно. Используя представленные в [20] графические зависимости между эквивалентной продолжительностью пожара и реальной продолжительностью пожара для перекрытий и стен, получим, что при проемности $\Pi = 0,15 \text{ м}^{0,5}$ продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости перекрытия, равна 29 мин, продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости межквартирной стены, а также стены между квартирой и коридором, равна 14 мин, а продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости стены лестничной клетки,

равна 25 мин. С учетом этого принимается $t_{огн} = 14 \text{ мин} = 840 \text{ с}$, а время блокирования коридора будет равно:

$$t_6 = \min\{t_{кр}^{п.б}, t_{кр}^T, t_{кр}^{т.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{т.п}, t_{огн}\} = 200 \text{ с.}$$

Для соседней квартиры 3 расчетное время эвакуации до лестничной клетки $t_{p3} = 0,5$ мин, до выхода наружу через лестничную клетку $t_{p3}^* = 1 \text{ мин} = 70 \text{ с}$. Поэтому время эвакуации из соседней квартиры по коридору до лестничной клетки при системе оповещения и управления эвакуацией IV типа, т.е. при времени начала эвакуации, равном 4 мин, будет составлять:

$$t_{н.э} + t_{p3} = 4 + 0,5 = 4,5 \text{ мин} = 270 \text{ с.}$$

Поскольку $0,8t_6 = 0,8 \cdot 200 = 160 \text{ с}$, то условие $t_{6л} \geq t_p + t_{н.э}$ не выполняется и возможность безопасной эвакуации из квартиры 3 не обеспечена.

Для оценки возможности безопасного спасения человека, который не смог эвакуироваться из квартиры 3, или человека, относящегося к немобильной группе населения (НМ) и находящегося в квартире 3, проверим выполнение соотношения (3) и (4). Как видно из рис. 2–6, в помещении 3, где находится спасаемый человек, в момент времени 1100 с от начала пожара, когда граница задымленной зоны достигает уровня 1,7 м относительно пола, значения концентрации HCL, температуры и оптической плотности дыма в этой зоне превышают допустимые значения (концентрации СО и СО₂ достигают предельных значений позднее), а концентрация О₂ также имеет недопустимые значения.

Для межквартирной перегородки $t_{огн} = 14 \text{ мин} = 840 \text{ с}$, с учетом чего время блокирования помещения 3 будет равно:

$$t_{б.пом} = \min\{1100, 840\} = 840 \text{ с.}$$

С учетом защиты здания СПС принимаем время от момента начала пожара до сообщения о нем в подразделение пожарной охраны $t_c = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$. Для здания, расположенного в пределах городского поселения, согласно ч. 1 ст. 76 [1], время прибытия составляет $t_{пр} = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$. К данному времени температура в коридоре 2, как видно на рис. 3, будет составлять более 150 °С, с учетом чего пожарные подразделения не смогут проникнуть в квартиру 3 через коридор и вынуждены будут перемещаться к находящемуся в этой квартире человеку через окно по раздвижной пожарной лестнице. Принимая алогично [15] время перемещения $t_{пер} = 4 \text{ мин}$, получим время начала спасения:

$$T_{н.сп} = t_c + t_{пр} + t_{пер} = 1 + 10 + 4 = 15 \text{ мин} = 900 \text{ с.}$$

Так как $0,8t_{б.пом} = 672$, то соотношение (3), т.е. $0,8t_{б.пом} \geq T_{н.сп}$ не выполняется, и условия безопасного спасения не обеспечены.

Таким образом, при анализируемых конструктивных решениях (соответствующих нормативным требованиям) условия безопасной эвакуации и спасения людей не выполняются даже при применении СОУЭ 4 типа.

В случае, если квартирные двери являются противопожарными EI 15, то в расчетах дверь квартиры 1 принимается полностью открытой до момента окончания эвакуации из этой квартиры $t_{з1} \leq \leq 1,5 \text{ мин} = 90 \text{ с}$, а далее — закрытой посредством устройства для самозакрывания, которым укомплектована противопожарная дверь. При этом коридор будет заполняться продуктами горения, изменение концентрации которых также показано на рис. 2–6. Анализ расчетов показывает, что через 90 с от начала пожара, т.е. к моменту закрытия противопожарной двери, в коридоре (помещение 2) опасные факторы пожара не превышают предельно допустимые значения. При этом их дальнейшее возрастание возможно только после потери огнестойкости перегородки, отделяющей коридор от квартиры 1 и смонтированной в ней противопожарной двери.

Таким образом, при наличии противопожарных дверей опасные факторы пожара в коридоре не превышают предельно допустимые значения и блокирование коридора будет определяться огнестойкостью перегородки, отделяющей его от горячей квартиры, т.е. $t_6 = t_{огн} = 14 \text{ мин} = 840 \text{ с}$ и условие безопасной эвакуации выполняются даже при системе оповещения и управления эвакуацией I типа (время начала эвакуации равно 9 мин), поскольку при расчетном времени эвакуации из квартиры 3 до лестничной клетки $t_{р3} = 0,5 \text{ мин}$:

$$t_{н.э} + t_{р3} = 9 + 0,5 = 9,5 \text{ мин} = 570 \text{ с},$$

$$0,8t_{б.кор} = 0,8 \cdot 840 = 672 \text{ с}.$$

При этом условие (1), т.е. $0,8t_6 \geq t_p + t_{н.э}$ выполняется и безопасность эвакуации обеспечена.

Для оценки возможности безопасного спасения человека, относящегося к немобильной группе населения (НМ) и находящегося в квартире 3, проверим выполнение соотношения (3) и (4).

Если двери квартир противопожарные, то не только коридор 2, но и помещение 3, где находится спасаемый человек, не блокируется опасными факторами пожара.

С учетом этого, время блокирования данного помещения будет определяться огнестойкостью межквартирной перегородки, с учетом чего $t_{б.пом} = = t_{огн} = 840 \text{ с}$.

Поскольку коридор не заблокирован опасными факторами пожара, то пожарные подразделения могут достигнуть находящегося в квартире 3 немобильного человека путем подъема по лестничной клетке и дальнейшего перемещения по коридору.

Достаточно корректно можно принять, что время от момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию до момента окончания перемещения к спасаемому человеку будет равно $t_{пер} = 3,5 \text{ мин}$ (в это время входит проведение разведки и непосредственное перемещение к спасаемому).

Таким образом, время начала спасения будет равно:

$$T_{н.сп} = t_c + t_{пр} + t_{пер} = 1 + 10 + 3,5 = 14,5 \text{ мин} = 810 \text{ с}.$$

Поскольку $0,8t_{б.пом} = 0,8 \cdot 840 = 672$, то соотношение (3), т.е. $0,8t_{б.пом} \geq T_{н.сп}$ не выполняется.

Таким образом, при применении противопожарных дверей квартир EI 15 выполняются только условия безопасной эвакуации, а условия безопасного спасения людей не выполняются.

Оценим возможность безопасного спасения людей для случая, когда межквартирная стена и стена, отделяющая коридор от квартиры 1, имеют предел огнестойкости REI 30, а проем в этой стене заполнен противопожарной дверью EI 30 (данные конструктивные решения могут быть реализованы, поскольку предусмотренный [22] предел огнестойкости несущих элементов составляет R 30).

Согласно [20], при проемности $\Pi = 0,15 \text{ м}^{0,5}$ продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости данных стен, равна 28 мин, с учетом чего $t_{огн} = 28 \text{ мин} = 1680 \text{ с}$.

Если двери квартир противопожарные, то коридор 2 и помещение 3, где находится спасаемый человек, не блокируется опасными факторами пожара.

С учетом этого время блокирования коридора и данного помещения будет определяться величиной $t_{огн}$, т.е. $t_{б.пом} = t_{б.пер} = t_{б.пер}^{пож} = t_{огн} = 1680 \text{ с}$.

Поскольку коридор не заблокирован опасными факторами пожара, то пожарные подразделения могут достигнуть находящегося в квартире 3 немобильного человека путем подъема по лестничной клетке и дальнейшего перемещения по коридору в эту квартиру. Как было показано выше, в этом случае время начала спасения будет равно $T_{н.сп} = 810 \text{ с}$.

Поскольку $0,8t_{б.пом} = 0,8 \cdot 1680 = 1344$, то соотношение (3), т.е. условие $0,8t_{б.пом} \geq T_{н.сп}$ выполняется.

Для оценки выполнения условий (4) и (8) на основе данных [24] принимаем период подготовки человека к спасению (продолжительность перекалывания на носилки и др.) $t_{сп1} = 0,5 \text{ мин} = 30 \text{ с}$, а время перемещения спасаемого наружу, на безопасное рас-

стояние от горящего здания $t_{\text{пер}}^* = 3,5 \text{ мин} = 210 \text{ с}$. Тогда время окончания спасения будет равно:

$$T_{\text{о.сп}} = T_{\text{н.сп}} + t_{\text{сп}} + t_{\text{пер}}^* = 810 + 30 + 210 = 1050 \text{ с.}$$

Поскольку $0,8t_{\text{б.пер}} = 0,8t_{\text{б.пер}}^{\text{п.ож}} = 0,8 \cdot 1680 = 1344$, то соотношения (4) и (8), т.е. условия $0,8t_{\text{б.пер}} \geq T_{\text{о.сп}}$ и $0,8t_{\text{б.пер}}^{\text{п.ож}} \geq T_{\text{о.сп}}$ выполняются.

Таким образом, если межквартирная стена и стена, отделяющая коридор от квартиры I, имеют предел огнестойкости REI 30, а проем в этой стене заполнен противопожарной дверью EI 30, выполняются условия безопасной эвакуации, а также условия безопасного спасения людей в случае, когда здание расположено в пределах городского поселения.

Если здание расположено в пределах сельского поселения, то время прибытия принимается равным $t_{\text{пр}} = 20 \text{ мин} = 1200 \text{ с}$ согласно ч. 1 ст. 76 [1], а время начала спасения будет равно:

$$T_{\text{н.сп}} = t_{\text{с}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пер}} = 1 + 20 + 3,5 = 24,5 \text{ мин} = 1470 \text{ с.}$$

Поскольку $0,8t_{\text{б.пом}} = 0,8 \cdot 1680 = 1344$, то соотношение (3), т.е. условие $0,8t_{\text{б.пом}} \geq T_{\text{н.сп}}$ не выполняется и возможность безопасного спасения для здания, расположенного в пределах сельского поселения, не обеспечивается.

Таким образом, анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей в жилом здании IV степени огнестойкости показал, что предусмотренные нормами конструктивные решения путей эвакуации позволяют обеспечить безопасность эвакуации только в случае, если двери квартир будут иметь предел огнестойкости EI 15, однако при этом не будет обеспечена безопасность спасения. Предусмотренный нормами предел огнестойкости несущих элементов R 30 позволяет обеспечить возможность безопасного спасения при условии, что межквартирная стена и стена, отделяющая коридор от квартиры I, имеют предел огнестойкости REI 30, а проем в этой стене заполнен противопожарной дверью EI 30, а также обеспечить время прибытия пожарных подразделений не более 10 минут (для зданий, расположенных в пределах городского поселения). Однако данного предела огнестойкости несущих элементов недостаточно для безопасного спасения при времени прибытия пожарных подразделений до 20 минут (для зданий, расположенных в пределах сельских поселений).

Анализ влияния фактора огнестойкости на безопасность людей в жилом здании V степени огнестойкости

В зданиях V степени огнестойкости требования к пределам огнестойкости строительных конструк-

ций не предъявляются. Вместе с тем для практических целей необходимо оценить минимально необходимые пределы огнестойкости строительных конструкций, при которых будет обеспечен необходимый уровень безопасности людей.

Проведенные выше обоснования применительно к анализируемому зданию (рис. 1) показывают, что для обеспечения возможности безопасного спасения людей необходимо, чтобы здание имело не ниже IV степени огнестойкости и располагалось в пределах городского поселения, а для зданий V степени огнестойкости корректно анализировать только возможность безопасной эвакуации.

Соотношение (1) может быть выполнено только при условии, что двери квартир будут противопожарными. С учетом этого, из (1) и (2) следует, что:

$$t_{\text{огн}} \geq 1,25(t_{\text{н.э}} + t_{\text{п}}). \quad (10)$$

При расчетном времени эвакуации из квартиры 3 наружу $t_{\text{рз}}^* = 1,2 \text{ мин} = 72 \text{ с}$, а также при системе оповещения и управления эвакуацией I типа (т.е. при времени начала эвакуации $t_{\text{н.э}} = 6 \text{ мин}$):

$$t_{\text{огн}} \geq 1,25(6 + 1,2) = 9 \text{ мин.}$$

Согласно [20], при проемности $\Pi = 0,20 \text{ м}^{0,5}$ данное значение времени достижения предельного состояния по огнестойкости будет обеспечено при пределе огнестойкости перекрытия (несущий элемент) REI 11, внутренних стен лестничной клетки, межквартирной стены и стены, отделяющей коридор от квартир REI 10 (при заполнении проема в данной стене противопожарной дверью EI 15 предел огнестойкости системы «стена — противопожарная дверь» принимается равным минимальному пределу огнестойкости, т.е. REI 10).

Полученные значения требуемых пределов огнестойкости исключают возможность применения в анализируемом здании в качестве несущих строительных конструкций незащищенных алюминиевых конструкций.

Таким образом, анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей в жилом здании V степени огнестойкости показал, что для обеспечения возможности безопасной эвакуации людей при пожаре необходимо, чтобы требуемый предел огнестойкости несущих элементов (включая перекрытие) был не менее R 11/REI 11, а требуемый предел огнестойкости внутренних стен лестничной клетки, межквартирной стены и стены, отделяющей коридор от квартир — не менее REI 10 (при заполнении проема в данной стене противопожарной дверью).

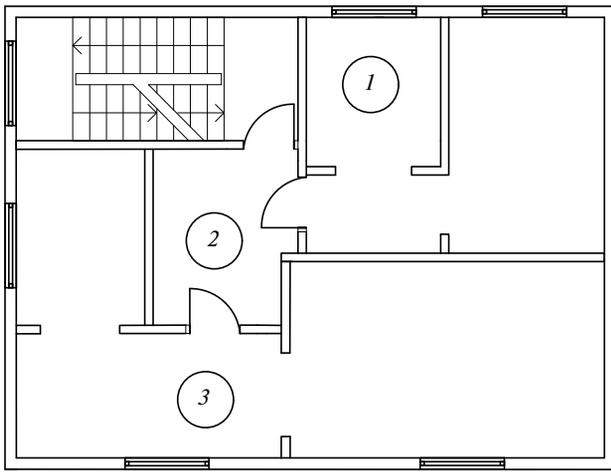


Рис. 1. Схема расположения помещений на этаже, на котором возник пожар

Fig. 1. Layout of the premises on the floor where the fire has broken out

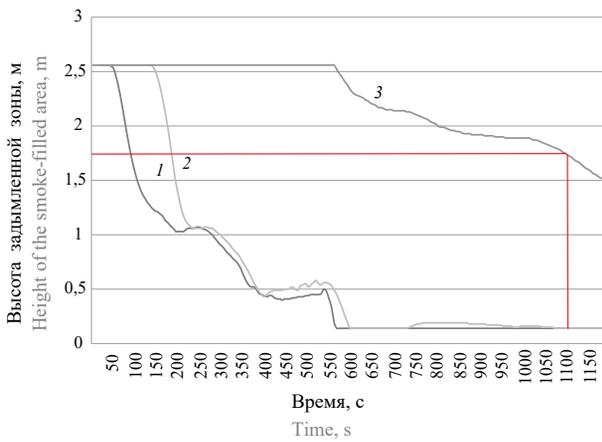


Рис. 2. Высота задымленной зоны в помещениях 1–3

Fig. 2. Height of the smoke-filled area in rooms 1–3

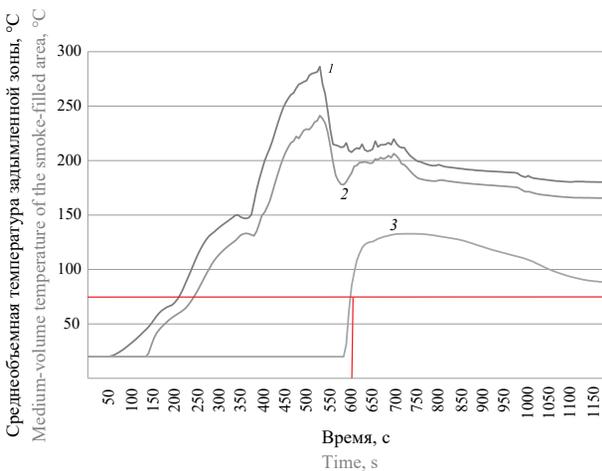


Рис. 3. Температура задымленной зоны в помещениях 1–3

Fig. 3. Temperature in the smoke-filled area of rooms 1–3

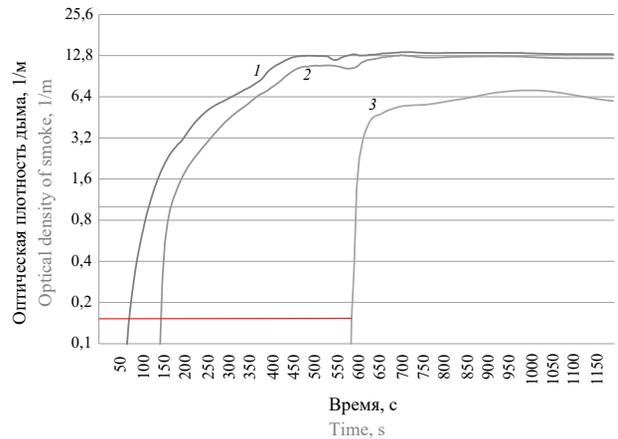


Рис. 4. Оптическая плотность дыма в задымленной зоне в помещениях 1–3

Fig. 4. Optical density of smoke in the smoke-filled area of rooms 1–3

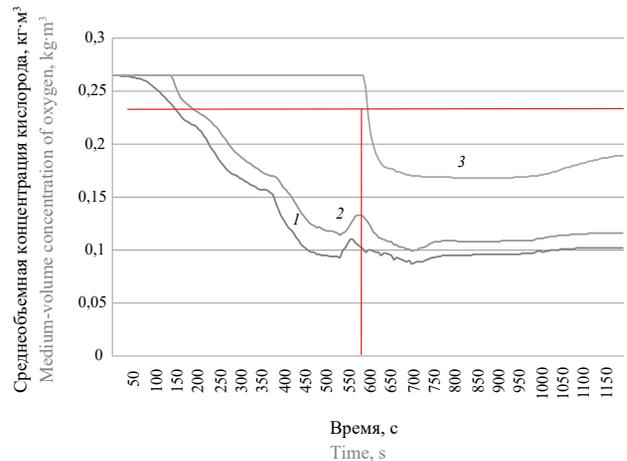


Рис. 5. Концентрация кислорода в задымленной зоне в помещениях 1–3

Fig. 5. Oxygen concentration in the smoke-filled area of rooms 1–3

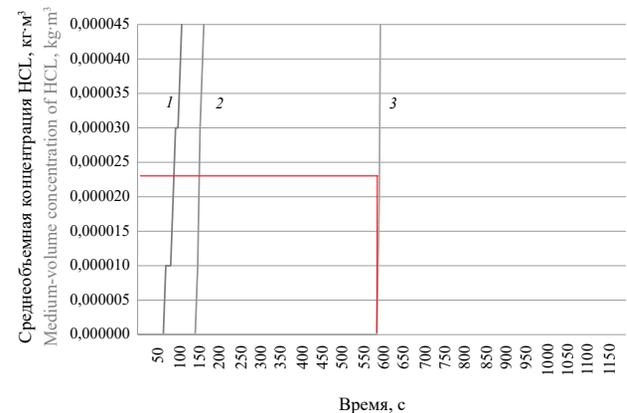


Рис. 6. Концентрация HCL в задымленной зоне в помещениях 1–3

Fig. 6. HCL concentration in the smoke-filled area of rooms 1–3

Выводы

Разработанные и представленные в статье общие методологические положения и математические соотношения позволяют оценить влияние фактора огнестойкости строительных конструкций на безопасность людей при эвакуации и спасении. Они базируются на расчетах временных интервалов развития опасных факторов пожара, эвакуации людей, перемещения пожарных подразделений к спасаемому человеку и его спасению, а также учитывают фактор потери огнестойкости строительных конструкций здания.

Сформулированные математические соотношения описывают условия, при которых будет обеспечена безопасность людей при эвакуации, безопасность спасаемых людей и безопасность пожарных подразделений с учетом пределов огнестойкости конструкций, которые отделяют пути эвакуации людей от горящих помещений, а также пути перемещения спасаемых людей и пожарных подразделений от горящих помещений.

Данные условия предполагают, что опасные факторы пожара на путях эвакуации, в помещении с нахождением человека, ожидающего спасения пожарными подразделениями, а также на путях перемещения этого человека пожарными подразделениями не превышают предельно допустимых значений до момента окончания эвакуации и/или спасения, а также не происходит потеря огнестойкости конструкций, которые влияют на безопасность людей. Поскольку перемещение пожарных к спаса-

емому может осуществляться по самостоятельному маршруту, то для них описаны отдельные дополнительные соотношения по безопасности.

Положения статьи позволяют оценить связь между степенью огнестойкости здания, пределами огнестойкости его строительных конструкций, временем прибытия пожарных подразделений, типом системы оповещения и управления эвакуации и возможностью безопасной эвакуации и безопасного спасения находящихся в этом здании людей.

С целью дальнейшего интегрирования разработанных методологических положений в Методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности использованы положения этой Методики в части прогноза распространения пожара между помещениями и в части предельно допустимых значений опасных факторов пожара для спасаемых людей.

Для иллюстрации возможности практического применения разработанных методологических положений проанализировано влияние фактора огнестойкости на безопасность людей в зданиях IV и V степеней огнестойкости.

Разработанные методологические положения позволяют дать количественные оценки влияния конструктивного исполнения эвакуационных путей и здания в целом в части огнестойкости строительных конструкций на возможность безопасной эвакуации людей, предусмотренную положениями ст. 50 и 53 № 123-ФЗ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. Федерального закона от 30.04.2021 № 117-ФЗ). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности. 2-е изд., испр. и доп. М. : ВНИИПО, 2016. 79 с.
3. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx>
4. *Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф., Бокарев А.И., Денисова Е.С.* Прогнозирование динамики тепломассообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
5. *Дроздов Д.С., Дроздова Т.И.* Графическое моделирование для оценки опасных факторов пожара // Техногенная и природная безопасность : сб. науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 24–26 апреля 2019 г. / под ред. С.М. Рогачевой, А.С. Жутова, И.М. Учайевой. Саратов : Амирит, 2019. С. 69–73.
6. *Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56.
7. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (2017) 14. Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-compartment fire scenarios final report of the PRISME project. January 2018. URL: www.oecd-nea.org
8. *McGrattan K., Miles S.* Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0

9. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. Fire dynamics simulator user's guide. National Institute of Standards and Technology, 2019. 288 p.
10. Leventon I., Bonny J. Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk. London: Interflam, 2019.
11. Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and influencing human behaviour in fire // Fire and Materials. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 412–430. DOI: 10.1002/fam.2391 URL: <https://www.nist.gov/publications/modelling-and-influencing-human-behaviour-fire> (Accessed February 15, 2022).
12. ISO 13571:2012. Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
13. Матюшин А.В., Гомозов А.В., Иващук Р.А. Моделирование динамики опасных факторов пожара в помещениях с людьми, нуждающимися в спасении, с учетом наличия неплотностей в притворах дверей // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 63–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20929304>
14. Матюшин А.В., Гомозов А.В., Иващук Р.А. Методика расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях при наличии неплотностей в притворах дверей (щелей) // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 92–100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25064046>
15. Пехотиков А.В., Гомозов А.В., Усолкин С.В., Иващук Р.А. Оценка возможности спасения людей при пожаре в жилом здании // Пожарная безопасность. 2021. № 3. С. 86–96. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010
16. Saarinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H. Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — validation by using tracer gases and simulated smoke videos // PLOS ONE. 2015. Vol. 10. Issue 7. P. e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
17. Martin D., McLaughlin B.P.E. Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke development. Arup North America Ltd. San Francisco, CA, USA. March, 2018. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFInfluenceGapSizeAroundSwingingDoors.pdf>
18. Zhang C., Asif U. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire // Fire Safety Journal. 2015. URL: <https://www.nist.gov/publications/heat-transfer-principles-thermal-calculation-structures-fire>
19. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гордиенко Д.М. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 31–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23092671>
20. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения : рекомендации. М. : ВНИИПО. 1988. 56 с.
21. Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий : методические рекомендации к СП 7.13130.2013. М. : ВНИИПО, 2013. 58 с.
22. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx>
23. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям (Изменение № 1). URL: <https://www.standards.ru/document/5315802.aspx>
24. Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Белосолов И.П. Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пос. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.

REFERENCES

1. *Technical Regulations on Fire safety requirements: Federal Law of the Russian Federation No. 123-FZ of July 22, 2008 (as amended. Federal Law No. 117-FZ of April 30, 2021)*. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (rus).
2. *Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, VNIPO, 2016; 79. (rus).
3. СП 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx> (rus).
4. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Heat-mass exchange processes dynamics forecasting in fires in typical multistorey apartment buildings. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
5. Drozdov D.S., Drozdova T.I. Graphic modeling for assessing fire hazards. *Tekhnogennaya i privodnaya bezopasnost: collection of scientific papers of the V International Scientific and practical conference. Saratov, April 24-26, 2019*. C.M. Rogacheva, A.S. Zhutova, I.M. Uchayeva (ed.). Saratov, Amirit Publ., 2019; 69-73. (rus).
6. Yarosh A.S., Chalatahshvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. The system of buildings and structures dangerous fire factors development mathematical models analysis. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry*. 2019; 1:50-56. (rus).
7. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (2017) 14. Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-

- compartment fire scenarios final report of the PRISME project. January 2018. URL: www.oecd-nea.org
8. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32*. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers, 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
 9. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. *Fire dynamics simulator user's guide*. National Institute of Standards and Technology, 2019; 288.
 10. Leventon I., Bonny J. *Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk*. London, Interflam, 2019.
 11. Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and influencing human behaviour in fire. *Fire and Materials*. 2017; 41(5):412-430. DOI: 10.1002/fam. 2391 URL: <https://www.nist.gov/publications/modelling-and-influencing-human-behaviour-fire> (Accessed February 15, 2022).
 12. ISO 13571:2012. Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
 13. Matyushin A.V., Gomofov A.V., Ivashchuk R.A. Simulation of dynamics of dangerous fire factors in premises with people in need of rescue, taking into account the frame ledge of doors. *Fire safety*. 2013; 4:63-68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20929304> (rus).
 14. Matyushin A.V., Gomofov A.V., Ivashchuk R.A. Design procedure of dynamics of dangerous factors of fire in rooms in the presence of loose-fitting doors (narrow slots). *Fire safety*. 2015; 4:92-100. (rus).
 15. Pekhotikov A.V., Gomofov A.V., Usolkina S.V., Ivashchuk R.A. Assessment of the possibility of human rescuing during fire in residential building. *Fire safety*. 2021; 3:86-96. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.30.18.010 (rus).
 16. Saarinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H. *Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — validation by using tracer gases and simulated smoke videos*. PLOS ONE. 2015; 10(7):e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
 17. Martin D., McLaughlin B.P.E. *Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke development*. Arup North America Ltd. San Francisco, CA, USA. March, 2018. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFInfluenceGapSizeAroundSwingingDoors.pdf>
 18. Zhang C., Asif U. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire. *Fire Safety Journal*. 2015. URL: <https://www.nist.gov/publications/heat-transfer-principles-thermal-calculation-structures-fire>
 19. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Gordienko D.M. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Firesafety*. 2015; 1:31-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23092671> (rus).
 20. *Methods for calculating the temperature regime of a fire in the premises of buildings for various purposes: Recommendations*. Moscow, VNIPO Ministry of Internal Affairs of the USSR. 1988; 56 (rus).
 21. *Estimated determination of the main parameters of smoke ventilation in buildings: guidelines for SP 7.13130.2013*. Moscow, VNIPO, 2013; 58. (rus).
 22. *SP 2.13130.2020. Fire protection systems. Ensuring fire resistance of objects of protection*. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx> (rus).
 23. *SP 4.13130.2013. Fire protection systems. Limiting the spread of fire at the objects of protection. Requirements for space-planning and structural solutions (Amendment No. 1)*. URL: <https://www.standards.ru/document/5315802.aspx> (rus).
 24. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., Kudrin I.S., Istratov R.N., Belosokhov I.R. *Evacuation and behavior of people in case of fires : textbook*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2015; 262. (rus).

Поступила 18.02.2022, после доработки 14.03.2022;
принята к публикации 18.05.2022

Received February 18, 2022; Received in revised form March 14, 2022;

Accepted May 18, 2022

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; РИНЦ ID: 760878; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

Information about the author

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760878; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

ИВАЩУК Роман Анатольевич, главный специалист по пожарной безопасности, ООО «Желдорпроект», Россия, 107023, г. Москва, Семеновская пл., 1А; РИНЦ ID: 544455; ORCID: 0000-0003-2250-2418; e-mail: newtrad@yandex.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; РИНЦ ID: 760879; ORCID:0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

ЛУЧКИН Сергей Алексеевич, младший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760855; ORCID:0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin. sergey@yandex.ru

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

Roman A. IVASHCHUK, Chief Fire Safety Specialist, «Zheldorproekt» LLC, Semenovskaya Square, 1A, Moscow, 107023, Russian Federation; ID RISC: 544455; ORCID: 0000-0003-2250-2418; e-mail: newtrad@yandex.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; ID RISC: 760879; ORCID: 0000-0001-9660-9221, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Sergey Alekseevich LUCHKIN, Junior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760855; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin. sergey@yandex.ru

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

Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России

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 случаев возникновения возгораний и взрывов от литий-ионных аккумуляторов в Российской Федерации за последние пять лет. Рассмотрены различные типы конструкций литий-ионных аккумуляторов и их пожарная опасность. Дано описание процесса теплового разгона аккумулятора с его последующим воспламенением и/или взрывом. Представлена обобщенная схема возможных причин возгорания литий-ионного аккумулятора, связанных с внутренними и внешними факторами. Показаны возможные пути снижения пожаровзрывоопасных случаев при хранении, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте батарейных блоков.

Ключевые слова: пожароопасность; тепловой разгон; короткое замыкание; механическое повреждение; горючие газы

Для цитирования: Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102.

 Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia

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 authors have analyzed the cases of fires and explosions caused by lithium-ion batteries in the Russian Federation over the past five years. Various types of designs of lithium-ion batteries and their fire hazards are considered. A description of the process of thermal runaway in a battery and its subsequent ignition and/or explosion is provided. A generalized chart of possible causes of ignition of a lithium-ion battery, triggered by internal and external factors, is presented. Ways to reduce fire and explosion hazards during the storage, operation, maintenance and repair of battery packs are shown.

Keywords: fire hazard; thermal runaway; short circuit; mechanical damage; combustible gases

For citation: Kharlamenkov A.S. The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):96-102 (rus.).

 Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС

За последние 5 лет в средствах массовой информации появляется все больше сообщений о пожарах и взрывах, связанных с механическим повреждением и неисправностью аккумуляторных батарей (далее АКБ). Значительное число опасных случаев происходит в процессе эксплуатации электроприборов различного назначения, начиная от электронных сигарет, сотовых телефонов и портативных аккумуляторов (power bank), заканчивая электро-самокатами и велосипедами. Также имеют место пожары на электропогрузчиках, электромобилях и электробусах.

Так как официальная статистика по числу пожаров от АКБ отсутствует, то можно опираться на информацию из отрывочных источников об отдельных случаях возгораний и взрывов аккумуляторов в РФ (см. табл.).

Следует отметить, что в настоящее время не существует методических рекомендаций по установлению причастности литий-ионных аккумуляторов к пожару, регламентированного порядка осмотра места пожара при отработке данной версии, а также методики исследования аккумуляторов в рамках проведения пожарно-технической судебной экспертизы с использованием современных инструментальных методов [1].

Случаи возгораний и взрывов литий-ионных аккумуляторов в РФ за 2018–2022 гг.

Тип устройства (изделия)	Дата события	Краткое описание события
Сотовый телефон	июль 2019 г.	Семилетний ребенок в г. Кургане погиб в результате взрыва смартфона
	сентябрь 2019 г.	14-летняя школьница погибла при взрыве смартфона, оставленного ночью на подзарядку
	22 октября 2019 г.	В г. Москве госпитализирован 18-летний юноша с тяжелыми ожогами от взорвавшегося в кармане смартфона
	2020 г.	В Волгограде ребенок собирался в школу и положил смартфон в карман брюк. Через время почувствовал, как гаджет сильно нагрелся. При попытке достать его из одежды телефон взорвался. Мальчик был госпитализирован с травмами кистей
	29 апреля 2021 г.	54-летний житель г. Санкт-Петербурга получил сильные ожоги после взрыва смартфона, находящегося в кармане куртки
Система нагревания табака (электронная сигарета)	октябрь 2019 г.	У 20-летнего гражданина РФ в г. Перми в руках взорвалась электронная сигарета во время проведения ее ремонта. В результате воспламенения одежды мужчина получил 5 % ожогов тела
	2021 г.	Ученик 47-й гимназии г. Екатеринбурга получил серьезные повреждения лица и рук в результате взрыва электронной сигареты во рту у подростка
	30 мая 2022 г.	На юге г. Москвы взорвалась электронная сигарета при попытке зарядить устройство до 100 %. 21-летний мужчина получил термический и химический ожоги 2-й степени, а также ожог 3-й степени на правой ноге
Портативный аккумулятор (power bank)	22 июня 2021 г.	Портативный аккумулятор взорвался в кармане 25-летнего мужчины. Устройство не было подсоединено к телефону и находилось в заряженном состоянии. Мужчина получил ожоги руки и бедра
Робот-пылесос	2021 г.	Ночью в результате короткого замыкания аккумуляторных батарей загорелся робот-пылесос, который стоял на подзарядке
Электросамокат (велосипед, скутер и т.п.)	март 2021 г.	В результате пожара в многоквартирном доме в г. Сочи погибли 43-летний мужчина и его 13-летний сын. Основной причиной возгорания считается взрыв батареи электросамоката
	апрель 2021 г.	В квартире г. Санкт-Петербург взорвался аккумулятор электросамоката, оставленного заряжаться на ночь. Молодой человек попал в реанимацию с многочисленными ожогами, травмы также получила его подруга, а их собаку спасти не удалось
	14 апреля 2022 г.	В одной из квартир в Новой Москве произошел пожар, в котором погиб 26-летний мужчина. Причиной стал взрыв батареи электросамоката заводского производства
	май 2022 г.	Один человек погиб и еще пятеро пострадали из-за возгорания электросамоката в столичной квартире. Электронный девайс заряжался ночью и был подключен к розетке у подножия кровати
Электропогрузчик	28 января 2018 г.	Произошло возгорание электропогрузчика на одном из предприятий г. Вологды
Электромобиль	август 2019 г.	В г. Москве водитель электромобиля не заметил припаркованный эвакуатор и боком врезался в него. Электрокар воспламенился, а потом дважды сдетонировал аккумулятор. Водитель попал в больницу с переломами носа и ноги
Электробус	20 сентября 2021 г.	Воспламенился вспомогательный аккумулятор под кабиной водителя на электробусе модели КамАЗ-6282. Пламя сильно повредило электробус, но не добралось до тяговых аккумуляторов. Инцидент привел к списанию многомиллионной машины
	октябрь 2021 г.	Загорелся моторный отсек электробуса КамАЗ-6282, направляющегося в парк без пассажиров. Водитель смог устранить горение своими силами
	26 января 2022 г.	В г. Москве загорелся электробус марки КамАЗ. Очаг возгорания на этот раз находился под кабиной водителя. При происшествии никто не пострадал



Рис. 1. Импорт литий-ионных аккумуляторных батарей в Россию: а — по странам мира; б — по регионам РФ

По состоянию на 2021 г. более 70 % населения России пользуются смартфонами, а к 2025 г. это значение должно достигнуть 80 %¹.

По прогнозам российский рынок систем нагревания табака с 2018 по 2023 г. увеличится на 411,1 % [2]. При этом за первые четыре месяца 2022 г. общий объем продаж электронных сигарет сократился на 16,1 %, что частично связано с повышением в 2022 г. акциза на системы нагревания табака и жидкостей для этих систем.

Начиная с 2016 г. в России наблюдается планомерный рост продаж портативных аккумуляторов, который в среднем составляет 23 % в год. При этом аккумуляторы с бóльшей емкостью пользуются на сегодняшний день значительным спросом (более 30 % от общего объема продаж).

По статистическим данным внешней торговли² импорт литий-ионных аккумуляторов в Россию за период с 2020 по 2021 г. составил более 12 млн ед. В среднем годовой прирост составляет более 16 %.

¹ Мобильная экономика. Россия и СНГ 2020 // GSMA Intelligence. 2020. № 12. URL: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/12/GSMA_MobileEconomy2020_RussiaCIS_Rus.pdf (дата обращения: 25.05.2022).

² Статистика внешней торговли России. Анализ онлайн // Портал СтатИмЭкс. 2021. URL: <https://statimex.ru/statistic/8507600000/import/202002-202102/world/RU> (дата обращения: 26.05.2022).

ОТВЕТ

В существующем статистическом сборнике «Пожары и пожарная безопасность» [5], ежегодно издаваемым ВНИИПО, не отражены данные о числе пожаров от таких видов изделий, как электронные сигареты, сотовые телефоны, электросамокаты и др. Возможно, они входят в список «прочих изделий, устройств», но имеет смысл вынести их отдельными пунктами в таблицу

Более 65 % аккумуляторных батарей прибывает в Россию из Китая (см. рис. 1, а).

Основной объем прибывающего товара сконцентрирован в г. Москве (более 57 %), на Ленинградскую область и г. Санкт-Петербург приходится около 19 % от общего количества аккумуляторов (см. рис. 1, б).

С января по апрель 2022 г. штучные продажи электротранспорта выросли более чем в 2 раза по сравнению с аналогичным периодом в 2021 г. [3]. Около 85 % продаж пришлось на электросамокаты, 10 % — на электровелосипеды и 5 % — на моноколеса и гироскутеры.

Только за первый квартал 2022 г. число проданных электромобилей возросло в 2,6 раза (827 ед.) по сравнению с предыдущим годом [4].

В период с июня 2021 г. по июнь 2022 г. число электробусов в г. Москве увеличилось в 1,5 раза и составило чуть более 1000 ед.³

Такое положение дел указывает на повышение опасности, связанной с пожарами от литий-ионных аккумуляторов в нашей стране.

Каковы же причины возникновения пожаров от данных видов аккумуляторов, и все ли типы литиевых аккумуляторов способны гореть и взрываться, создавая источники зажигания?

³ Статистика подвижного состава // Интернет-сайт «Городской электротранспорт». 2022. URL: <https://transphoto.org/show.php?t=9&cid=1> (дата обращения: 30.05.2022).

статистических показателей для анализа ухудшения или улучшения пожарной обстановки в указанной области применения электрооборудования.

Начиная с 70-х гг. XX в. развитие литий-ионных аккумуляторов получило стремительное развитие. Первыми моделями перезаряжаемых АКБ, с использованием в качестве носителей заряда ионов лития, стали аккумуляторы

муляторы с анодом из металлического лития и катодом из дисульфида титана или дисульфида молибдена [6]. Позднее, в 1980-х гг., материал катода был заменен на литированный оксид кобальта (LiCoO_2). Данные типы аккумуляторов представляли высокую пожарную опасность, так как в процессе их перезарядки осаждаемые на аноде ионы лития образовывали древовидные структуры, называемые дендритами (металлические усы). В результате повторных циклов перезарядки аккумуляторов происходил активный рост дендритов и повреждение разделяющего слоя (сепаратора⁴) между отрицательным и положительным электродами. Это приводило к резкому разряду аккумулятора (короткое замыкание) с выделением большого количества тепла. При достижении температуры 70–90 °С литий начинал взаимодействовать с электролитом (раствор солей лития) с выделением различных горючих газов [7]. Процесс реакции способствовал дальнейшему нагреву внутри корпуса батареи, и при достижении температуры 180 °С оксид кобальта (катод) начинал разлагаться с выделением кислорода, который вступал в реакцию с литием. Последний, при достижении его температуры самовоспламенения (от 179 °С⁵), начинал гореть, усиливая выделение газов и продолжая повышать температуру внутри корпуса. В конечном счете происходило повреждение корпуса аккумулятора с последующим выбросом пламени или взрывом.

Попытки борьбы с образованием на поверхности анода дендритов ведутся и по сей день. Для этих целей ученые ищут пути устранения или замедления образования металлических усов за счет использования различных видов покрытий (пленок) на границе электролита и литий-металлического анода, улучшающих свойства естественной пассивной пленки (Solid Electrolyte Interface), формирующейся при первоначальной зарядке литий-ионного аккумулятора [8–10].

⁴ Сепараторы литий-ионных аккумуляторных батарей обычно выполняются в виде мембраны из пористого полипропилена, ограничивающей движение ионов от одного электрода к другому. Сепараторы выполняют защитную функцию. В случае излишнего нагрева электролита батареи мембрана способна практически полностью блокировать движение ионов, тем самым останавливая химическую реакцию и перегрев корпуса аккумулятора.

⁵ Международная карта химической безопасности (ICSC). Литий // База данных ICSC. International Labour Organization (ILO). 2022. URL: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0710&p_lang=ru (дата обращения: 02.06.2022).

В отдельных исследованиях, путем повышения давления (уплотнения) ячеек аккумулятора до 350 кПа, удалось добиться исключения образования дендритов и практически идеального распределения лития на поверхности анода [11]. Представленные способы по снижению вероятности возникновения коротких замыканий из-за роста дендритов имеют важное значение для дальнейшей разработки современных электромобилей. Ведь аккумуляторы с анодом из металлического лития имеют меньший вес по сравнению с аналогичными из графита, что в конечном счете будет влиять на общий вес автотранспортного средства.

Замена в 1990-х гг. материала анода с металлического лития на графит частично снизила пожарную опасность литий-ионных батарей, но не исключила ее полностью. С образованием дендритов было покончено, но при наличии внутренних механических дефектов и выполнении некачественной сборки, а также перегреве электролита в процессе зарядки АКБ происходил запуск реакции «самоуспокоения», описанной выше и представленной на рис. 2.

Похожий процесс наблюдался в случаях неисправности систем защиты и ограничения напряжения (сенсоры, контроллеры, балансиры заряда, устройства «положительного температурного коэффициента» (PTS), устройства прерывания тока (CID) и т.д.⁶).

В общем случае можно констатировать, что развитие пожароопасной ситуации имеет место как при нормальной работе аккумуляторов, так и при их повреждении или некачественной сборке. Подробные аспекты обеспечения пожаровзрывобезопасности АКБ, с учетом требований нормативных документов, представлены в статье [12].

Общая схема развития пожароопасной ситуации в процессе эксплуатации литий-ионных аккумуляторных батарей представлена на рис. 3.

Следует понимать, что не все современные типы литий-ионных аккумуляторов представляют высокую пожарную опасность.

К ним можно отнести варианты АКБ, в которых катод взамен LiCoO_2 выполняется из литий-железо-фосфата LiFePO_4 или литий-марганцевой шпинели LiMn_2O_4 . Данные виды аккумуляторов имеют меньшую стоимость, менее токсичны, более термоустойчивы и экологичны. С точки зрения

⁶ Системы защиты, обеспечивающие безопасную работу литий-ионных аккумуляторов, будут рассмотрены в отдельной статье.

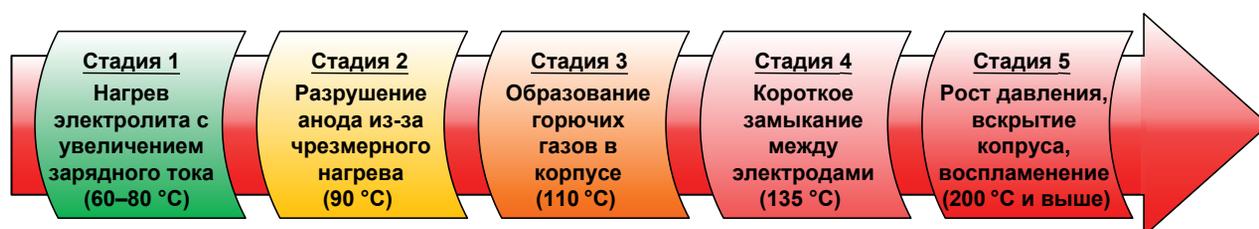


Рис. 2. Процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов



Рис. 3. Схема возможных причин возгорания литий-ионного аккумулятора

пожарной безопасности данные аккумуляторы являются наиболее предпочтительными для использования, так как не воспламеняются и не взрываются.

На практике применяются литий-полимерные аккумуляторы (Li-pol), где вместо пористого пропитанного электролитом сепаратора применяется твердый полимерный электролит в виде пленки, позволяющий осуществлять обмен ионами. Конструкция позволяет изготавливать такие аккумуляторы практически любой формы и размеров. Данный тип батарей достаточно безопасен, но в силу того, что их электропроводность в стандартных температурных режимах очень низкая, они не имеют широкого распространения. Это не касается «гибридных» литий-полимерных аккумуляторов, для увеличения ионной проводимости которых к твердотельному электролиту добавляют гелеобразный (гель-полимерный электролит). Такие аккумуляторы очень чувствительны к механическим повреждениям и способны воспламениться в случае нарушения герметичности корпуса.

В обращении также имеются аккумуляторы с анодом из пентатитаната лития (литий-титанат «Li₄Ti₅O₁₂») взамен графита. Данные аккумуляторы способны обеспечивать высокую плотность тока и скорость перезарядки даже при низких температурах окружающей среды (до минус 30 °C) и являются достаточно надежными и безопасными при использовании.

Представленные выше типы аккумуляторов постепенно вытесняют литий-кобальт оксидные, но в большинстве устройств (за исключением электромобилей) продолжают использоваться LiCoO₂ аккумуляторы марки

18650 и более емкие и габаритные модели марок 20700/21700/32650. Пожарная опасность применения указанных моделей связана с тем, что они устанавливаются в конечные устройства (электросамокаты и велосипеды) в виде набора n-го количества аккумуляторов (пакетов) в единую цепь – батарейный блок. Выход из строя (перегрев или воспламенение) одного элемента блока может привести к возгоранию всех ячеек, что представляет реальную опасность развития пожара. Поэтому большое внимание следует уделять не только выбору более «пожаробезопасных» типов аккумуляторов, но и разработке способов ограничения воспламенения смежных пакетов в батарейных блоках.

Фирмы-производители зачастую для снижения стоимости блоков экономят на безопасности, тем самым снижая стоимость конечной продукции. Обычному покупателю аккумуляторов не особо интересен вопрос о наличии систем безопасности, предусмотренных изготовителем, поэтому конечная (более низкая) цена будет играть решающую роль.

В качестве основных мер по снижению случаев возгораний и взрывов литий-ионных АКБ могут быть предложены варианты выполнения следующих пунктов правил безопасности:

- не оставлять батареи без присмотра во время их подзарядки;
- выполнять зарядку батарей в хорошо проветриваемых местах, не находящихся на путях эвакуации;
- не допускать нахождения вблизи мест подзарядки горючих веществ и материалов;

- не накрывать заряжаемые батарейные блоки и пакеты горючими материалами и материалами с низкой теплопроводностью;
- не заряжать батареи при отрицательных температурах;
- не допускать перегрева корпуса батарей выше 60–75 °С (в зависимости от типа аккумулятора);
- не допускать перезаряда и переразряда батареи (обычно контролируется защитными платами);
- осуществлять хранение батарей в сухих помещениях при температурах 15–25 °С;
- не допускать длительное хранение батареи в разряженном состоянии;
- не использовать батарею, имеющую вздутие и механические повреждения корпуса;
- исключать возможные механические удары о батарею в процессе ее эксплуатации;
- приобретать батареи и зарядные устройства у проверенных производителей;
- перед покупкой новых аккумуляторов или электроприборов, оснащенных ими, провести анализ наличия/отсутствия сертификатов качества и наличия систем защиты от перегрева, перезаряда, перенапряжения и т.д.;
- использовать батарейные блоки и пакеты только заводского исполнения;
- не выполнять самостоятельную замену или ремонт батарейных блоков и пакетов, если данные операции не предусмотрены инструкцией по техническому обслуживанию;
- при возгорании аккумулятора в помещении следует: выполнить его обесточивание (при подзарядке); использовать воду для охлаждения очага горения; накрыть горящие элементы негорючим материалом (асбестовое полотно или аналог); максимально снизить количество вдыхаемого воздуха с продуктами горения; обеспечить максимально возможное проветривание помещения; покинуть помещение (зону задымления).

Таким образом, чем больше пользователей будут знать о пожарной опасности аккумуляторов и предусмотренных мерах по предотвращению развития воспламенения (взрыва), тем меньше пожароопасных событий можно ожидать в будущем.

Имеет смысл включить в программы дополнительного профессионального образования по направлению «Пожарная безопасность» рассмотрение теоретических вопросов по содержанию и эксплуатации аккумуляторных батарей и работающих от них электроприборов [13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов М.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов. Проблемы установления причастности литий-ионных аккумуляторов к пожарам в настоящее время // Актуальные проблемы борьбы с преступлениями и иными правонарушениями. 2019. № 19–1. С. 34–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37146638>
2. Левинская А. Рынок вейпов и электронных сигарет вырастет к 2023 году в пять раз// РБК. Деловое информационное пространство. 2019. URL: <https://www.rbc.ru/business/04/09/2019/5d6e43e39a7947757c2ba18d> (дата обращения: 25.05.2022).
3. Соболев М. Продажи электросамокатов выросли минимум в два раза // Газета «Ведомости». 2022. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2022/05/05/921104-rodazhi-elektrosamokatov> (дата обращения: 28.05.2022).
4. Тиммерханов А. Рынок новых электрокаров в марте вырос более чем вдвое // Аналитическое агентство «АВТОСТАТ». 2022. URL: <https://www.autostat.ru/news/51249> (дата обращения: 28.05.2022).
5. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : стат. сб. / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО. 2021. 112 с.
6. Кулова Т. Аккумуляторы, изменившие жизнь // Наука и жизнь. 2019. № 12. С. 2–7.
7. Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Санкт-Петербургского Университета ГПС МЧС России. 2020. № 3. С. 14–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44108898>
8. Yu Z., Mackanic D., Michaels W., Qin J., Yi Cui. A dynamic, electrolyte-blocking, and single-ion-conductive network for stable lithium-metal anodes // *Joule*. 2019. Vol. 3. Issue 11. Pp. 2761–2776. DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.025
9. Ren X., Zhang Y., Engelhard M.H., Li Q., Zhang J.-G., Xu W. Guided lithium metal deposition and improved lithium coulombic efficiency through synergistic effects of LiAsF₆ and cyclic carbonate additives // *ACS Energy Letters*. 2018. Vol. 3. No. 1. Pp. 14–19. DOI: 10.1021/acsenergylett.7b00982
10. Cheng X.B., Zhao M.Q., Chen C., Pentecostand A., Maleski K., Mathis T. et al. Nanodiamonds suppress the growth of lithium dendrites // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. No. 336. DOI: 10.1038/s41467-017-00519-2
11. Fang C., Lu B., Pawar G., Zhang M., Cheng D. Chen S. et al. Pressure-tailored lithium deposition and dissolution in lithium metal batteries // *Nature Energy*. 2021. Vol. 6. Issue. 10. Pp. 987–994. DOI: 10.1038/s41560-021-00917-3
12. Пехотилов В.А., Смелков Г.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Анализ нормативных требований в области обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXII Международной научно-практической конференции. Балашиха, 5–6 ноября 2020 г. Балашиха, 2020. С. 487–493. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44324722>

13. Серегин А.Б., Бутенко Ю.Л., Сидоренко Д.В. Пожарная опасность электросамокатов // Пожарная и техно-сферная безопасность: проблемы и пути совершенство-

вания. 2021. Т. 1. № 8. С. 367–371. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46240260>

Материал поступил в редакцию 10.06.2022

Received June 10, 2022

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 «ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Контакты:
Тел.: 8 (495) 109-05-58
e-mail: ikbs@mgsu.ru,
info@ikbs-mgsu.ru

НАУЧНО- ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС В ОБЛАСТИ ГАЗОДИНАМИКИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Уникальный
комплекс установок
для моделирования
нагрузок при
внутренних и внешних
дефлаграционных
взрывах



- ◆ Расчет взрывных нагрузок любого характера: дефлаграция, детонация, физический взрыв
- ◆ Разработка нормативно-методической базы и рекомендаций по обеспечению взрывобезопасности и взрывоустойчивости промышленных, энергетических, транспортных и гражданских объектов (в том числе АЭС)
- ◆ Разработка, испытание и внедрение взрывозащитных устройств (легкосбрасываемых конструкций, инженерного оборудования)
- ◆ Экспертиза аварийных взрывов, включая восстановление сценария развития аварии

www.ikbs-mgsu.ru