

2-2022

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СОВРЕМЕННОГО
МЕТАЛЛОПРОКАТА СТРОИТЕЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ



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 02 ноября 2020 г.
Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Корзухина Л.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректоры **Светличная Л.В.,**
Ермихина О.В.
Дизайнер **Алейникова А.Г.**

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

Тел./факс: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

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 Российской
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 28.04.2022.

Выход в свет 30.04.2022.

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: picryl.com;
wikimedia.org; 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, Ньютаунбаби, Велико-
британия)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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)

Роу Р.Л., профессор (Школа права Университета Джорджтаун, Вашингтон, США)

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. Соломен-
ко 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)

Шилдс Т. Дж., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбаби, Великобритания)

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.В. ПЕХОТИКОВ, А.Н. ПОЛЕТАЕВ,
А.В. ГОМОЗОВ, С.В. УСОЛКИН
Современные требования к проектированию систем
противопожарной защиты образовательных организаций

5

A.V. PEKHOTIKOV, A.N. POLETAEV,
A.V. GOMOZOV, S.V. USOLKIN
Current requirements to designing fire protection systems
for educational establishments

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Об оценке взрывоопасности ядерного графита
в 1-м³ камере

15

N.L. POLETAEV
About the explosibility of nuclear graphite measured
in a 1 m³ chamber

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Н.И. КОНСТАНТИНОВА, А.В. ЗУБАНЬ,
А.А. БУЛГАКОВА
Совершенствование методологического подхода
к оценке пожарной опасности матрасов

22

N.I. KONSTANTINOVA, A.V. ZUBAN,
A.A. BULGAKOVA
Improvement of a methodological approach
to assessing the fire hazard of mattresses

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

И.В. САМАРИН, А.В. КРЮЧКОВ,
А.Ю. СТРОГОНОВ
Расчет регламентированного количества выносных
датчиков газосигнализаторов вокруг открытых
установок нефтеперерабатывающих заводов
прямоугольной формы

33

I.V. SAMARIN, A.V. KRYUCHKOV,
A.Yu. STROGONOV
The calculation of the regulated number
of remote sensors of gas analyzers surrounding
rectangular outdoor facilities
at oil refineries

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Д.М. ГОРДИЕНКО, Ю.Н. ШЕБЕКО
Пожарная безопасность объектов инфраструктуры
транспорта на водородном топливе

В.И. ГОЛОВАНОВ, Г.И. КРЮЧКОВ, А.Н. СТРЕКАЛЕВ,
А.А. КОМИССАРОВ, С.М. ТИХОНОВ
Исследование механических свойств современного
металлопроката строительного назначения
при повышенных температурах

41

D.M. GORDIENKO, Yu.N. SHEBEKO
The fire safety of infrastructure facilities
for hydrogen-powered vehicles

52

V.I. GOLOVANOV, G.I. KRYUCHKOV, A.N. STREKALEV,
A.A. KOMISSAROV, S.M. TIKHONOV
A study on mechanical properties
of modern rolled structural metal
at elevated temperatures

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

С.Г. НЕМЧИНОВ, С.Г. ЦАРИЧЕНКО
Автоматические и роботизированные
системы пожаротушения как альтернатива
оперативным подразделениям на автономных
и малообслуживаемых объектах
топливно-энергетического комплекса

63

S.G. NEMCHINOV, S.G. TSARICHENKO
Automatic and robotized firefighting
systems at self-contained and low-maintenance
facilities of the fuel and energy sector
as an alternative to quick response
teams

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 взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере

Стр. 15



Расчет количества выносных датчиков газосигнализаторов

Стр. 33



Пожаробезопасность объектов транспорта на водородном топливе

Стр. 41



Исследование свойств современного металлопроката

Стр. 52

Стр. 63



Автоматические и роботизированные системы пожаротушения

No. 2 VOL. 31
2022

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



FIRE AND
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВ БЕЗОПАСНОСТЬ

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, Russian

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 02, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Correctors **Svetlichnaya L.V.,
Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova A.G**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Corresponding to: Post office box 26,
Moscow, 121352, Russia.

Phone/Fax: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvbezopasnost/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 28.04.2022.

Date of publication 30.04.2022.

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 (Se-
menov 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)

R.L. Roe, Professor (Georgetown University Law Center, Washington, United States)

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

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

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

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)

T.J. Shields, Ph. D., Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)

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

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 5–14
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(2):5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.5-14>

Современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций

Андрей Владимирович Пехотиков, Александр Николаевич Полетаев,
Александр Васильевич Гомозов ✉, Степан Владимирович Усолкин

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. Чтобы обеспечить современный уровень пожарной безопасности зданий дошкольных образовательных и общеобразовательных организаций, необходимо актуализироваться на требованиях к проектированию систем противопожарной защиты этих объектов, особенно в той части, которая касается возможности безопасной эвакуации и спасения находящихся в этих зданиях детей и персонала, а также повысить эффективность действий пожарных подразделений при проведении спасательных работ и пожаротушении и оптимизировать объемно-планировочные и конструктивные решения.

Цели и задачи. Целью статьи является обоснование актуализированных требований к проектированию систем противопожарной защиты зданий дошкольных образовательных организаций и зданий общеобразовательных организаций, базирующихся на положениях Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ).

Методы. Используется аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций на основе комплексного применения положений № 123-ФЗ с учетом современных архитектурных и конструктивных тенденций строительства подобных зданий, а также результатов расчетов пожарного риска.

Результаты. Внедрение результатов работы в новые редакции вступивших в действие сводов правил в области пожарной безопасности, в том числе СП 1.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы», СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты», СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям» (Изменение № 1) и др., а также в СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования» (Изменение № 3).

Выводы. На основе исследований были обоснованы современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций, направленных на повышение безопасности находящихся в них детей при эвакуации и спасении с учетом размещения в этих зданиях помещений различного класса функциональной пожарной опасности, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, а также используемых строительных материалов и инженерного оборудования.

Ключевые слова: подъезды для пожарных автомобилей; противопожарные расстояния; эвакуация; пожарный риск; спасение; допустимая высота здания; допустимый этаж размещения помещений; предел огнестойкости; класс пожарной опасности; площадь этажа; пожарный отсек

Для цитирования: Пехотиков А.В., Полетаев А.Н., Гомозов А.В., Усолкин С.В. Современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.5-14.

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

Current requirements to designing fire protection systems for educational establishments

Andrey V. Pekhotikov, Alexander N. Poletaev, Alexander V. Gomozov ✉, Stepan V. Usolkin

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. It is necessary to update requirements for designing fire protection systems for these facilities in terms of the safe evacuation and rescue of children and personnel, increase the efficiency of fire emergency response units conducting rescue operations, as well as optimize space planning and structural solutions to ensure a high level of fire safety inside buildings of preschool and general education organizations.

Goals and objectives. The purpose of the article is to validate the updated requirements for designing fire protection systems for buildings of preschool and general education organizations in compliance with the Federal Law of the Russian Federation dated July 22, 2008 No. 123-FZ "Technical regulations governing fire safety requirements" (hereinafter – "Law 123-FZ").

Methods. An analytical method is used to formulate and substantiate the requirements for designing fire protection systems for educational establishments within the framework of the integrated application of Law 123-FZ and with regard for current trends in architecture and structural design of similar buildings, as well as fire risk calculations.

Results. The results of the work are contributed to the amended sets of effective fire safety rules, such as SP 1.13130.2020 "Fire protection systems. Evacuation routes and exits", SP 2.13130.2020 "Fire protection systems. The fire resistance of protected facilities", SP 4.13130.2013 "Fire protection systems. Restricting fire spread throughout protected facilities. Requirements for space planning and structural solutions" (Amendment 1), etc., as well as SP 251.1325800.2016 "Buildings of general education organizations. Design rules" (Amendment 3).

Conclusion. The research findings were employed to substantiate the current requirements for designing fire protection systems for educational establishments to improve the safety of children in the process of evacuation and rescue, if these buildings have premises featuring various classes of functional fire hazard, fire resistance limits and fire hazard classes of building structures, building materials and engineering installations.

Keywords: fire truck driveways; fire separation distances; evacuation; fire risk; rescue; allowable building height; allowable floor for premises; fire resistance limit, fire hazard class; floor area; fire compartment

For citation: Pekhotikov A.V., Poletaev A.N., Gomofov A.V., Usolkin S.V. Current requirements to designing fire protection systems for educational establishments. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.5-14 (rus).

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

Введение

Разработка современных требований к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций обусловлена объективной необходимостью повысить уровень противопожарной защиты данных объектов на основе внедрения в практику их строительства результатов современных исследований, позволяющих повысить безопасность детей и персонала при эвакуации, повысить эффективность действий пожарных подразделений при проведении спасательных работ и пожаротушении, оптимизировать объемно-планировочные и конструктивные решения в части размеров этих зданий, размещения в них помещений различного класса функциональной пожарной опасности, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, а также используемых строительных материалов и инженерного оборудования.

Это связано с тем, что из-за возрастных, физических и психологических особенностей находящихся в этих зданиях детей, а также при возможном их нерациональном поведении при пожаре, достаточно сложно обеспечить организованную эвакуацию всего контингента детей, что делает необходимым реализацию мероприятий по ограничению распространения пожара на пути эвакуации, проектированию дополнительных путей эвакуации и эвакуационных выходов, ограничению высоты зданий образовательных организаций и высоты помеще-

ний, в которых находятся дети, внедрению объемно-планировочных и конструктивных решений, позволяющих обеспечить безопасное спасение и т.д.

Кроме того, развитие современных тенденций в изменении архитектурных, планировочных, конструктивных и технологических решений зданий образовательных организаций также требует разработки как соответствующих дополнений к требованиям по проектированию систем противопожарной защиты таких зданий, так и разработки новых требований.

Целью настоящей статьи является обоснование актуализированных требований к проектированию систем противопожарной защиты дошкольных образовательных организаций, а также зданий общеобразовательных организаций в части градостроительных решений, обеспечению возможности безопасной эвакуации и спасения находящихся в этих зданиях детей и персонала, оптимизации объемно-планировочных и конструктивных решений по размещению в этих зданиях помещений различного класса функциональной пожарной опасности, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, а также пожарной опасности используемых строительных материалов и инженерного оборудования.

При этом использован аналитический метод обоснования и формирования требований к проектированию систем противопожарной защиты на основе комплексного применения положений Федераль-

ного закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ) [1], учета современных архитектурных и конструктивных тенденций строительства подобных зданий, достижений в области противопожарной защиты объектов этого класса функциональной пожарной опасности, а также результатов расчетов пожарного риска, которые проводились для этих объектов.

Градостроительные требования

Новые противопожарные требования по проектированию градостроительных решений зданий образовательных организаций направлены на обеспечение эффективности проведения работ по спасению людей в условиях пожара, а также на ограничение распространения пожара в эти здания от некапитальных сооружений.

Положениями свода правил СП 2.13130.2012 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» [2], действовавшего в период с 2012 по 2019 годы, допускалось новое строительство зданий школ (Ф4.1) высотой не более 4 этажей, а также реконструкция пятиэтажных зданий школ.

Вместе с тем решение социальных задач обусловило необходимость нового строительства 5-этажных зданий школ, учебных корпусов школ-интернатов и учреждений начального профессионального образования. Однако необходимая эффективность действий пожарных подразделений по спасению людей в таких зданиях возможна только при наличии достаточного количества автолестниц и автоподъемников, что может быть обеспечено только в крупнейших городах согласно классификации [3].

С учетом этого в актуализированную редакцию свода правил СП 2.13130.2020 [4] внесены новые требования о том, что строительство и реконструкция 5-этажных (высотой до 19 м) зданий школ, учебных корпусов школ-интернатов, учреждений начального профессионального образования допускается в крупнейших городах, а в городах, не относящихся к крупнейшим, допускается строительство школ высотой не более 4 этажей. При этом здания 4-этажных школ должны иметь I степень огнестойкости и класс конструктивной пожарной опасности С0. Их высота не должна превышать 15 м.

Для повышения эффективности действий пожарных подразделений по спасению людей существующие требования о подъезде пожарных автомобилей к зданиям образовательных организаций (Ф1.1 и Ф4.1) со всех сторон дополнены новыми положениями о том, что для указанных зданий должна быть предусмотрена возможность установки ручных выдвижных пожарных лестниц [4], а также

то, что на территории, расположенной между подъездом для пожарных автомобилей и зданием или сооружением, не допускается размещать ограждения (за исключением ограждений для палисадников), воздушные линии электропередачи, осуществлять рядовую посадку деревьев и устанавливать иные конструкции, способные создать препятствия для работы пожарных автолестниц и автоподъемников [5].

Эти новые требования позволяют исключить препятствия (кусты, малые архитектурные формы и др.) для использования при спасении детей с нижних этажей выдвижной пожарной лестницы по ГОСТ Р 53275–2009 [6], входящей в комплект снаряжения пожарного автомобиля и позволяющей подняться на этаж, высота которого (разность отметок земли и подоконника) составляет до 9 м, а также обеспечить непосредственный доступ пожарных с автолестниц и автоподъемников в окна всех помещений с пребыванием детей, которые расположены на верхних этажах.

Анализ пожаров показал, что некапитальные сооружения, в том числе временные сооружения без фундаментов, выполненные с применением горючих материалов в конструкциях или оборудовании, при размещении между зданиями служат дополнительным источником распространения пожара с горящего на соседнее здание, а также сами создают угрозу распространения пожара на соседний объект при горении временного сооружения.

Данное обстоятельство не может не учитываться, в том числе при проектировании систем противопожарной защиты зданий образовательных организаций (Ф1.1 и Ф4.1), что послужило основанием для формирования нового требования, сформулированного в [5], согласно которому противопожарные расстояния от общественных зданий до некапитальных сооружений (построек) следует принимать в зависимости от их степени огнестойкости и класса функциональной пожарной опасности аналогично капитальным зданиям.

На практике это означает, например, что расстояние от здания детского сада II степени огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности С0 до отдельно стоящего тентового укрытия для детей, которое с учетом отсутствия наружных стен классифицируется как сооружение V степени огнестойкости, должно составлять не менее 10 м согласно табл. 1, приведенной в [5].

Объемно-планировочные и конструктивные решения

Новые противопожарные требования по проектированию объемно-планировочных и конструктивных решений зданий образовательных организаций направлены на повышение уровня безопасности

детей и персонала при эвакуации и спасении, обеспечение возможности оптимизации архитектурных решений, а также на внедрение в практику строительства данных объектов современных достижений в области пожарной безопасности. Это обеспечивалось на основе актуализации комплекса требований, изложенных в [2, 5, 7] и других нормативных документах в области пожарной безопасности.

Повышение уровня безопасности при эвакуации детей в детских дошкольных учреждениях базируется на новых требованиях [8] в сочетании с обобщенными результатами расчетов пожарного риска, согласно которым групповая ячейка, которую допускается считать единым помещением, предназначенная для одновременного пребывания более 10 человек (детей и персонала), должна иметь не менее 2 эвакуационных выходов. Если наружные открытые лестницы для эвакуации из групповых ячеек не предусмотрены, то данные выходы должны вести в разные участки (секции) коридоров, а каждый из этих участков коридоров должен вести на разные лестничные клетки или к разным выходам наружу, а деление коридоров на участки (секции) должно быть предусмотрено противопожарными перегородками не ниже 2-го типа. Данные решения, как показывают расчеты пожарного риска, выполненные в соответствии с [9], обеспечивают наибольший уровень безопасности детей при эвакуации для зданий любой этажности.

Кроме того, новыми требованиями [8] предусмотрено проектирование дверей эвакуационных выходов из групповых ячеек в поэтажные коридоры и на лестничные клетки противопожарными с пределом огнестойкости не менее EI 15 (ранее действовало требование о необходимости применения обычных дверей с уплотненными притворами). Эти новые требования предполагают необходимость проектирования перегородок, отделяющих указанные коридоры от примыкающих помещений, с пределом огнестойкости не менее (R)EI(W) 15 для одноэтажных зданий и не менее (R)EI(W) 30 для остальных зданий. При этом указанные перегородки должны иметь класс пожарной опасности К0 независимо от класса конструктивной пожарной опасности здания.

Необходимо отметить, что современные нормативные документы по пожарной безопасности не исключают возможности проектирования открытых лестниц от первого до вышележащих этажей в зданиях детских дошкольных учреждений. При этом данные лестницы должны быть отделены от примыкающих помещений и коридоров на каждом этаже противопожарными перегородками 1-го типа. Вместе с тем предусматривать эвакуацию по данным лестницам и через

пространства этих лестниц из групповых ячеек не допускается (для эвакуации из групповых ячеек следует проектировать выходы на лестничные клетки или наружные открытые лестницы).

Кроме того, новые требования [4] предусматривают, что в залах для музыкальных и физкультурных занятий, которые допускается размещать на 3-м этаже детских дошкольных учреждений согласно п. 7.1.9 СП 252.1325800.2016 «Здания дошкольных образовательных организаций. Правила проектирования» [10], при площади залов более 50 м² один из эвакуационных выходов должен быть предусмотрен непосредственно на лестничную клетку.

Для повышения безопасности детей в случае необходимости их спасения через оконные проемы в зданиях детских дошкольных учреждений, а также для обеспечения эффективности спасательных работ новыми требованиями [4] предусмотрены следующие новые дополнительные мероприятия.

Для зданий на свайных фундаментах дополнительно ограничена высота 2-этажных зданий до высоты 5 м (ранее это требование действовало только для одноэтажных зданий). Кроме того, требования по ограничению высоты зданий на свайных фундаментах распространены на подобного типа здания вне зависимости от региона их постройки, а не только на районы Крайнего Севера.

Поскольку распространение пожара по фасадам здания является фактором, исключающим возможность спасения детей через оконные проемы, в дополнение к требованиям [4] о применении в зданиях детских дошкольных учреждений только негорючей облицовки, отделки и теплоизоляции стен, также необходимо использовать негорючие материалы козырьков над входом в здание и негорючие материалы кровли входного тамбура (толщина горючих защитно-декоративных покрытий не должна превышать 0,3 мм при окрашивании, напылении и т.п.).

Аналогичным образом не допускается размещение на фасаде, а также на кровле рекламных конструкций, медиаэкранов, медиафасадов и т.п. Кроме того, кровли зданий детских дошкольных учреждений должны быть защищены негорючими материалами толщиной не менее 20 мм или запроектированы с группой пожарной опасности КП0 по ГОСТ Р 56026 [11] в сочетании с устройством эксплуатируемых участков кровли согласно положениям [12] для эвакуации из технических надстроек и зон размещения инженерного оборудования.

Кроме того, в актуализированной редакции [4] предусмотрена возможность проектирования зданий ДОО общего типа с числом мест до 350 только для зданий класса конструктивной пожарной опасности С0, т.е. исключена возможность

проектирования этих зданий класса С1. Это связано с тем, что в зданиях класса конструктивной пожарной опасности С1 наружные стены с внешней стороны могут иметь класс пожарной опасности К2, что значительно более опасно, чем класс К0 для зданий класса конструктивной пожарной опасности С0 (из-за возможности распространения горения по этим стенам, что исключает возможность спасения детей через оконные проемы).

Повышение уровня безопасности при эвакуации детей в зданиях общеобразовательных организаций (Ф4.1) обеспечивается следующими новыми дополнительными требованиями.

Новые требования [4] предусматривают, что при ненормируемых значениях степени огнестойкости и классе конструктивной пожарной опасности число учащихся в зданиях Ф4.1 не должно превышать 100 человек, а здания класса конструктивной пожарной опасности С1 могут проектироваться высотой не более двух этажей.

Актуализированные требования [8] предусматривают, что в этих зданиях высотой 2 этажа и более каждый этаж должен быть разделен на пожарные секции (зоны) с площадью этажа не более 1300 м² противопожарными стенами 2-го типа или противопожарными перегородками 1-го типа, что позволяет реализовать способ поэтапной горизонтальной эвакуации, т.е. проектное решение, обеспечивающее возможность эвакуации людей при пожаре в смежную секцию (зону) здания, размещенную на том же этаже (уровне), отделенную противопожарными перегородками и обеспеченную эвакуационными выходами в соответствии с нормативными требованиями.

Кроме того, положениями [8] предусмотрен комплекс требований, направленных на максимальное возможное ограничение распространения пожара из помещений на пути эвакуации, которое обеспечивается за счет того, что перегородки и стены, отделяющие пути эвакуации (общие коридоры, холлы, фойе, вестибюли, галереи) от помещений, должны проектироваться в зданиях I–III степеней огнестойкости с пределом огнестойкости не менее (R)EI(W) 30, а в остальных зданиях — не менее (R)EI(W) 15. Указанные перегородки следует предусматривать с классом пожарной опасности К0. Для реализации этой цели дополнительно необходимо обеспечить, чтобы из открывающихся заполнений проемов в указанных стенах или перегородках только двери могли иметь ненормируемые пределы огнестойкости (требования к материалам этих дверей не предъявляются). Окна и другие светопрозрачные заполнения в указанных перегородках следует предусматривать неоткрывающимися из материалов НГ. Их допускается предусматривать с ненормируемым пределом огнестойкости только в случае, если суммарная пло-

щадь окон и дверей в пределах каждого помещения не превышает 25 % от площади перегородки, отделяющей помещение (учебное помещение, класс и т.д.) от коридора. Люки, которые не имеют устройств для самозакрывания, должны предусматриваться с пределом огнестойкости, соответствующим пределу огнестойкости перегородки.

Для повышения безопасности детей в случае необходимости их эвакуации или спасения новыми требованиями [8] исключено проектирование помещений для пребывания детей любых возрастных групп в подвальном этаже и в цокольном этаже, заглубленном более чем на 0,5 м, размещение помещений начальных классов выше 2-го этажа, а групп продленного дня с возможностью организации помещений для сна — выше 1-го этажа. Аналогичным целям служат новые требования данного документа, допускающие размещение на четвертом и пятом (при его наличии) этажах учебных помещений только для старших классов, а также устройство дверей эвакуационных выходов из коридоров на лестничные клетки противопожарными с пределом огнестойкости не менее EI 15.

Необходимо отметить, что положениями [13, 14] предусмотрена необходимость устройства в зданиях общеобразовательных организаций (Ф4.1) актов, зрительных и др. залов. Вместе с тем высота размещения этих залов была традиционно ограничена 2-м этажом.

Современные требования [8] позволяют проектировать зальные помещения (за исключением предназначенных для учащихся начальной школы) на 3-м и выше этажах в зданиях I, II степеней огнестойкости при выполнении следующих условий:

- наличие дополнительного эвакуационного выхода из зала на самостоятельную лестничную клетку типа Л1, изолированную от остальной части здания глухими строительными конструкциями, ведущую непосредственно наружу и имеющую световые проемы размером не менее 1 × 1,2 м на каждом этаже (допускается использование лестничной клетки, предназначенной для эвакуации с эксплуатируемой кровли здания);
- защита зала вытяжной противодымной вентиляцией и приточной противодымной вентиляцией для компенсирующей подачи наружного воздуха в нижнюю часть этого зала согласно [15];
- наличие в зале естественного освещения через проемы в стенах для возможности их использования в качестве аварийных выходов. Размеры указанных проемов должны составлять не менее 0,8 × 1,75 м. Количество проемов следует определять исходя из расчета не менее 1 проем на каждые полные или неполные

50 человек (мест в зале). Проемы должны располагаться на высоте не более 1 м от пола.

Современные требования [8] также позволяют проектировать в зданиях общеобразовательных организаций I, II степеней огнестойкости эксплуатируемые кровли, предназначенные для пребывания детей (за исключением учащихся начальной школы) с размещением на них спортивных и иных площадок, а также прогулочных зон. С учетом положений [4] верхняя граница ограждений эксплуатируемой кровли (эксплуатируемого покрытия) должна располагаться на высоте не более 19 м в крупнейших городах и не более 15 м в остальных случаях относительно отметки поверхности проезда для пожарных машин, а покрытие следует проектировать классом пожарной опасности K0 с пределом огнестойкости не менее REI 45.

При этом количество эвакуационных выходов с эксплуатируемой кровли следует определять в соответствии с требованиями [8] для этажей исходя из максимального количества людей, которые могут находиться на кровле. Данные выходы должны быть предусмотрены на лестничные клетки, одна из которых (самостоятельная лестничная клетка типа Л1) должна вести непосредственно наружу, иметь световые проемы с размерами остекленной части не менее $1 \times 1,2$ м на каждом этаже и быть изолированной от остальной части здания глухими строительными конструкциями (эвакуация на данную лестничную клетку может быть предусмотрена непосредственно из одного из залов, расположенных на 3-м и выше-лежащих этажах). Иные лестничные клетки, предназначенные для эвакуации с эксплуатируемой кровли, не должны размещаться в одной зоне с актовым залом.

Новыми требованиями при строительстве и реконструкции пятиэтажных зданий общеобразовательных организаций предусмотрено, что эвакуационные лестничные клетки должны иметь выходы непосредственно наружу, двери эвакуационных выходов на лестничные клетки и в соседние пожарные секции (зоны) следует предусматривать противопожарными с пределом огнестойкости не менее EI 30, а ширину указанных выходов следует определять в соответствии с расчетом, исходя из зависимости не более 115 человек на 1 м эвакуационного выхода, но не менее 1,5 м. При этом на пятом этаже допускается размещать только административные помещения и учебные помещения для старших классов.

Оптимизация проектных решений на основе новых требований

Новые требования содержат ряд положений, позволяющих оптимизировать проектные решения в части их упрощения и сокращения затрат на строительство.

В частности, новые положения [4] дополнены указаниями о том, что этажность общественных и административно-бытовых зданий определяется числом надземных этажей без учета верхнего технического этажа. Целью данных указаний являлась необходимость обеспечения максимально возможной этажности этих зданий при фиксированной степени огнестойкости с учетом того, что актуализированная редакция СП 118.13330.2012 «Общественные здания и сооружения» [13], как указано в приложении Г.8*, предусматривает, что технический этаж, расположенный над верхним этажом, учитывается при определении этажности здания.

Кроме того, новые положения [4] позволяют при необходимости проектировать детские дошкольные учреждения с числом мест более 350 при условии устройства на объекте нескольких пожарных отсеков аналогичного класса функциональной пожарной опасности Ф1.1 (в том числе с разной степенью огнестойкости и классом конструктивной пожарной опасности), каждый из которых удовлетворяет требованиям [4].

При этом, согласно положениям [8], не запрещается предусматривать эвакуацию при пожаре из одного пожарного класса функциональной пожарной опасности Ф1.1 в смежный пожарный отсек аналогичного класса функциональной пожарной опасности. Данное обстоятельство позволяет проектировать эвакуацию из одного пожарного отсека через коридор не в собственную лестничную клетку, а в лестничную клетку смежного пожарного отсека, т.е. проектировать несколько пожарных отсеков с общими лестничными клетками. При этом в случае пожара необходимо обеспечить одновременное оповещение о необходимости эвакуации все пожарные отсеки с общими лестничными клетками и подтвердить расчетами пожарного риска соответствие данного решения требованиям № 123-ФЗ.

Аналогичным образом в случае превышения в зданиях школ допустимой площади пожарного отсека положения [4, 8] позволяют проектировать в составе школы несколько пожарных отсеков с обеспечением эвакуации в общие лестничные клетки. При этом эвакуация из одного пожарного отсека может быть предусмотрена через собственный коридор в коридор смежного пожарного отсека.

Новые положения [4] также позволяют не предусматривать незадымляемые лестничные клетки и наружные открытые лестницы при проектировании пятиэтажных зданий общеобразовательных организаций.

Дополнительно оптимизированы положения [4] в части требований к конструкциям переходов, расположенных в пределах одного пожарного отсека зданий класса Ф1.1 или Ф4.1. Данные требования

позволяют использовать в конструкциях переходов горючие материалы (при обеспечении класса пожарной опасности таких конструкций K0), а также проектировать стены зданий в местах примыкания к ним переходов с пределом огнестойкости EI 45 вместо EI 120, что позволяет существенно сократить затраты по обеспечению пределов огнестойкости несущего каркаса без снижения уровня пожарной безопасности здания в целом и при выполнении требований № 123-ФЗ.

Требования к инженерному оборудованию систем противопожарной защиты

Реализация новых требований необходимости проектирования стен и перегородок, отделяющих пути эвакуации в зданиях класса Ф1.1 и Ф4.1 от примыкающих помещений, с нормируемым пределом огнестойкости в сочетании с положениями ч. 7 ст. 82 № 123-ФЗ [1] обуславливает необходимость устройства в местах прохождения кабельных каналов, коробов, кабелей и проводов через данные конструкции кабельных проходов, огнестойкость которых, определенная согласно ГОСТ Р 53310–2009 [16], должна быть не меньше огнестойкости пересекаемой конструкции.

Для снижения динамики распространения пожара в зданиях школ положениями нового свода правил [17] предусмотрено, что здания общеобразовательных школ высотой более 4 этажей, не считая верхнего технического этажа, должны быть защищены не только системами пожарной сигнализации, но и автоматическими установками пожаротушения, которые, в свою очередь, должны быть запроектированы в соответствии с требованиями новых сводов правил [18, 19]. При этом должны защищаться не только помещения категории В4, но и чердаки.

Новые требования также обеспечивают внедрение в практику противопожарной защиты зданий класса Ф1.1 и Ф4.1 современных систем пожарной автоматики, в том числе применение адресных систем пожарной сигнализации, которая позволяет идентифицировать место возникновения пожара, а следовательно, разработать алгоритм оповещения о пожаре, позволяющий реализовать оптимальный режим обеспечения эвакуации при пожаре с учетом деления зданий на пожарные секции (зоны) и пожарные отсеки.

Для этого, согласно положениям нового свода правил [19], предусмотрена защита зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1.1 и Ф4.1 с общей площадью более 3000 м² адресными системами автоматической пожарной сигнализации.

Кроме того, для обеспечения надежного электропитания, при проектировании питания электроприемников, линий связи, электрооборудования систем противопожарной защиты зданий (СПЗ) и со-

оружений необходимо применять новые требования [20], в том числе требование о необходимости для электроприемников СПЗ, установленных в зданиях класса функциональной пожарной опасности Ф1.1 с круглосуточным пребыванием людей, предусматривать автономные резервные источники электропитания.

Выводы

Проведенные аналитические исследования по разработке современных требований к проектированию систем противопожарной защиты зданий дошкольных образовательных учреждений и зданий общеобразовательных учреждений позволяют повысить возможность безопасной эвакуации и спасения находящихся в этих зданиях детей и персонала, обеспечить эффективность действий пожарных подразделений при проведении спасательных работ и пожаротушении, оптимизировать объемно-планировочные и конструктивные решения в части размеров этих зданий, размещения в них помещений различного класса функциональной пожарной опасности, пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций, а также используемых строительных материалов и инженерного оборудования на базе положений Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Новые требования позволяют учесть специфические особенности этих зданий, обусловленные тем, что из-за возрастных, физических и психологических особенностей находящихся в них детей, а также возможности их нерационального поведения при пожаре достаточно сложно обеспечить организованную и быструю эвакуацию всего контингента детей, что делает необходимым реализацию дополнительных мероприятий по ограничению распространения пожара на пути эвакуации, проектированию дополнительных путей эвакуации и эвакуационных выходов, ограничению высоты зданий образовательных организаций и высоты помещений, в которых находятся дети, внедрению объемно-планировочных и конструктивных решений, позволяющих обеспечить безопасное спасение и т.д.

Кроме того, новые требования позволяют учесть современные тенденции в изменении архитектурных, планировочных, конструктивных и технологических решений зданий образовательных организаций.

На основе исследований был подготовлен и введен в действие комплекс новых сводов правил в области пожарной безопасности — СП 1.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы», СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. Федерального закона от 27 декабря 2018 г. № 538-ФЗ). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/
2. СП 2.13130.2012. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты (Изменение № 1). М. : ВНИИПО МЧС России, 2012. 22 с.
3. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. URL: <https://www.standards.ru/document/6316152.aspx>
4. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx>
5. 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>
6. ГОСТ Р 53275–2009. Техника пожарная. Лестницы ручные пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний.
7. СП 1.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (Изменение № 1). М. : ВНИИПО МЧС России, 2010. 43 с.
8. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx>
9. 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.
10. СП 252.1325800.2016. Здания дошкольных образовательных организаций. Правила проектирования. URL: <https://www.standards.ru/document/6258221.aspx>
11. ГОСТ Р 56026–2014. Материалы строительные. Метод определения группы пожарной опасности кровельных материалов.
12. СП 17.13330.2017. Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26-76. URL: <https://www.standards.ru/document/6335270.aspx>
13. СП 118.13330.2012. Общие технические здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009. URL: <https://www.standards.ru/document/5308986.aspx>
14. СП 251.1325800.2016. Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования. URL: <https://www.standards.ru/document/6258227.aspx>
15. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности (Изменение № 1). URL: <https://www.standards.ru/document/6527877.aspx>
16. ГОСТ Р 53310–2009. Проходки кабельные, вводы герметичные и проходы шинопроводов. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний на огнестойкость.
17. СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Требования пожарной безопасности. URL: <https://www.standards.ru/document/6713466.aspx>
18. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. URL: <https://www.standards.ru/document/6713467.aspx>
19. СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования. URL: <https://www.standards.ru/document/6636602.aspx>
20. СП 6.13130.2021. Системы противопожарной защиты. Электроустановки низковольтные. Требования пожарной безопасности. URL: <https://www.standards.ru/document/6854581.aspx>

REFERENCES

1. Technical regulations on fire safety requirements : Federal Law of the Russian Federation No. 123-FZ dated July 22, 2008 (as amended by Federal Law No. 538-FZ of December 27, 2018). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (rus).

2. SP 2.13130.2012. Systems of fire protection. Fire-resistance security of protecting units protection (Amendment No. 1). Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2012; 22. (rus).
3. SP 42.13330.2016. Urban development. Urban and rural planning and development. URL: <https://www.standards.ru/document/6316152.aspx> (rus).
4. SP 2.13130.2020. Systems of fire protection. Fire-resistance security of protecting units. URL: <https://www.standards.ru/document/6528503.aspx> (rus).
5. SP 4.13130.2013. Systems of fire protection. Restriction of fire spread at objekt of defence. Requirements to spacial layout and structural decisions (Amendment No. 1). URL: <https://www.standards.ru/document/5315802.aspx> (rus).
6. GOST R 53275–2009. Fire fighting equipment. Manual fire ladders. General technical requirements. Test methods. (rus).
7. SP 1.13130.2009. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. (Change 1). Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2010; 43. (rus).
8. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx> (rus).
9. 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).
10. SP 252.1325800.2016. Preschool educational institution buildings. Design rules. URL: <https://www.standards.ru/document/6258221.aspx> (rus).
11. GOST R 56026–2014. Building materials. Method for determining the fire hazard group of roofing materials. (rus).
12. SP 17.13330.2017. The roofs. Updated edition of SNiP II-26-76. URL: <https://www.standards.ru/document/6335270.aspx> (rus).
13. SP 118.13330.2012. Public buildings and works. Updated edition of SNiP 31-06-2009. URL: <https://www.standards.ru/document/5308986.aspx> (rus).
14. SP 251.1325800.2016. Educational institution buildings. Design rules. URL: <https://www.standards.ru/document/6258227.aspx> (rus).
15. SP 7.13130.2013. Heating, ventilation and conditioning. Fire safety requirements. (Change No. 1). URL: <https://www.standards.ru/document/6527877.aspx> (rus).
16. GOST R 53310–2009. Cable entries, sealed entries and busbar passages. Fire safety requirements. Fire test methods. (rus).
17. SP 486.1311500.2020. The list of buildings, structures, premises and equipment, subject to protection by automatic extinguishing and fire alarm systems. URL: <https://www.standards.ru/document/6713466.aspx> (rus).
18. SP 485.1311500.2020. Automatic fire-extinguishing systems. Designing and regulations rules. URL: <https://www.standards.ru/document/6713467.aspx> (rus).
19. SP 484. 1311500.2020. Fire alarm systems and automation of fire protection systems. Designing and regulations rules. URL: <https://www.standards.ru/document/6636602.aspx> (rus).
20. SP 6.13130.2021. Fire protection system. Electrical installations low-voltage. Fire safety requirements. URL: <https://www.standards.ru/document/6854581.aspx> (rus).

Поступила 09.11.2021, после доработки 12.01.2022;

принята к публикации 04.03.2022

Received November 9, 2021; Received in revised form January 12, 2022;

Accepted March 4, 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: Pekhnikov.a@mail.ru

Information about the authors

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760878; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhnikov.a@mail.ru

ПОЛЕТАЕВ Александр Николаевич, 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, 12; РИНЦ ID: 774248; ORCID: 0000-0002-4500-8263; e-mail: poletaev350@mail.ru

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760879; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomofovav@yandex.ru

УСОЛКИН Степан Владимирович, 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, 12; РИНЦ ID: 1115190; ORCID: 0000-0001-9341-252X; e-mail: usolkinsv@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Alexander N. POLETAEV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, 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: 774248; ORCID: 0000-0002-4500-8263; e-mail: poletaev350@mail.ru

Alexander V. GOMOZOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760879; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomofovav@yandex.ru

Stepan V. USOLKIN, Researcher, 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: 1115190; ORCID: 0000-0001-9341-252X; e-mail: usolkinsv@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Об оценке взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере

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. Ядерный графит представляет угрозу образования аэровзвеси пыли графита (АПГ) при демонтаже вышедших из эксплуатации ядерных реакторов. В то же время нет ясного ответа на вопрос о взрывоопасности АПГ. Согласно обзору международных исследований, взрывоопасность АПГ либо отсутствует, либо слабо выражена (Phylaktou H.N. и др., 2015). В настоящей работе приводятся аргументы в пользу мнения о взрывобезопасности АПГ.

Выбранный результат исследования. Рассматривался известный результат исследования горения АПГ со средним размером частиц 5 мкм и концентрацией около 450 г/м³ в камере объемом 1,138 м³ с источником зажигания фирмы Fr. Sobbe GmbH («Sobbe 10 kJ»). Максимальное избыточное давление $\Delta P_{\max}$ в камере составило 0,47 бар, что в соответствии с EN 14034-3 отвечает случаю взрывоопасной аэровзвеси (1 бар = 100 кПа).

Интерпретация результата исследования. Проведено сравнение осциллограмм давления для двух случаев: случая максимального проявления взрывоопасности АПГ ($\Delta P_{\max} = 0,47$ бар; $dP/dt|_{\max} = 3,8$ бар/с) и случая срабатывания источника зажигания в отсутствие аэровзвеси ($\Delta P_{\max} = 0,027$ бар; $dP/dt|_{\max} = 2,7$ бар/с). Сопоставление показало, что первые 20 мс изменения давления в камере обусловлены, в основном, горением источника зажигания: характерные значения $\Delta P = 0,03$ бар и $(dP/dt) \approx 3,8$ бар/с близки к показателям горения «Sobbe 10 kJ» в отсутствие АПГ. Дальнейшее увеличение ΔP происходит при постоянном или резко убывающем значении (dP/dt) , что означает монотонное снижение скорости пламени и выявляет негорючесть АПГ.

Выводы. Ввиду малости $\Delta P_{\max}$ рассмотренную АПГ возможно считать взрывобезопасной при нормальных атмосферных условиях. Графики зависимости давления продуктов горения и скорости его нарастания от времени являются важными сведениями о горении аэровзвеси во взрывных камерах при низкой взрывоопасности пыли.

Ключевые слова: пыль графита; аэровзвесь; взрыв; осциллограмма давления; снижение скорости пламени

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21

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

Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m³ chamber

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. Nuclear graphite poses a threat due to the formation of the graphite dust – air mixture (GDAM) during the dismantling of decommissioned nuclear reactors. However, there is no clear answer to the question on the GDAM explosibility. A review of international studies suggests that GDAM is either inexplosive or its explosibility is weak (Phylaktou H.N. et al., 2015). In this paper, the authors advance arguments for the explosion safety of GDAM.

Selected research result. The authors considered a well-known result of a study on the combustion of GDAM with an average particle size of 5 μm, the concentration of about 450 g/m³ in a 1.138 m³ chamber, and an ignition

source made by Fr. Sobbe GmbH ("Sobbe 10 kJ"). The maximum overpressure $\Delta P_{\max}$ was 0.47 bar in the chamber, and it fitted the case of an explosive air suspension, according to EN 14034-3 (1 bar = 100 kPa).

Interpretation of the research result. Pressure oscillograms were compared for the following two cases: the case of the maximum manifestation of the GDAM explosion hazard ($\Delta P_{\max} = 0.47$ bar; $dP/dt|_{\max} = 3.8$ bar/s) and the case of combustion of an ignition source in the absence of air suspension ($\Delta P_{\max} = 0.027$ bar; $dP/dt|_{\max} = 2.7$ bar/s). The comparison shows that the first 20 ms of a pressure change inside the chamber is mainly due to the combustion of the ignition source: the characteristic values $\Delta P = 0.03$ bar and $(dP/dt) \approx 3.8$ bar/s are close to the "Sobbe 10kJ" combustion index in the absence of GDAM. A further increase in ΔP is accompanied by the constant or sharply decreasing value of (dP/dt) , which means a monotonous decrease in the flame velocity and proves the incombustibility of GDAM.

Conclusions. Due to the smallness of $\Delta P_{\max}$, GDAM can be considered nonexplosive under normal atmospheric conditions. Dependency diagrams, relating the pressure of combustion products and its growth to time offer important information about the combustion of the air suspension in explosion chambers under the condition of a low dust explosion hazard.

Keywords: graphite dust; air suspension; explosion; pressure oscillogram; flame velocity reduction

For citation: Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21 (rus).

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

Введение

Эксплуатация ядерных реакторов с замедлителями из материала, получившего наименование ядерного графита (далее — графита), сопровождается образованием большого количества мелкодисперсной пыли графита [1]. Этот материал представляет угрозу образования аэрозвеси пыли графита (далее — АПГ) при демонтаже вышедших из эксплуатации ядерных реакторов, что с необходимостью требует ясного ответа на вопрос о взрывоопасности АПГ. В то же время данные о взрывоопасности АПГ имеют противоречивый характер из-за существенного различия результатов тестирования данной пыли в разномасштабных камерах и несогласованности количественного критерия взрывоопасности пыли между национальными нормами. В частности, избыточное давление взрыва АПГ при стандартном исследовании в 20-литровой взрывной камере может превысить 500 кПа [1–4], а во взрывной камере объемом 1 м³ избыточное давление взрыва АПГ не поднимается выше 50 кПа^{1,2} [5]. Согласно классификации [6], АПГ демонстрирует принадлежность к аэрозвесям с низкой взрывоопасностью, которым в последнее время стали уделять повышенное внимание [7–10].

Всестороннему изучению горючести и взрывоопасности графита посвящен многолетний цикл работ исследователей из различных стран, выводы которых обобщены в отчете [11]. Некоторые из этих выводов проанализированы в [12], где предлагается для объективной оценки взрывоопасности АПГ использовать результаты испытаний в 1-м³ камере. По-

следнее объясняется завышением взрывоопасности АПГ в маломасштабной камере из-за энергоемкого источника зажигания (эффектом «overdrive») [13, 14].

Основной вывод авторов [11, 12] сводится к выражению «АПГ либо взрывобезопасна, либо взрывоопасность АПГ слабо выражена». Предположение о слабовыраженной взрывоопасности АПГ основывается на результатах стандартного исследования АПГ в 1-м³ камере и определении взрывоопасности аэрозвеси по Европейским нормам EN 14034-3:2006+A1:2011. Согласно этому определению, аэрозвесь взрывоопасна, если избыточное давление продуктов горения в 1-м³ камере превышает критическое значение $P_{cr} = 30$ кПа, что имеет место для АПГ. Сомнения авторов [11, 12] можно понять, если принять во внимание требование американского стандарта ASTM E1226-2012a, согласно которому $P_{cr} = 100$ кПа и АПГ следует признать взрывобезопасной.

С целью получения дополнительных аргументов для вывода о взрывобезопасности АПГ, исследованной в 1-м³ камере, в настоящей работе приводится более тщательный анализ информации о результате данного исследования, изложенном в [11]. Для этого проводится сопоставление случая максимального проявления взрывоопасности АПГ со случаем срабатывания источника зажигания в отсутствие аэрозвеси.

Выбранный результат исследования [13]

В [11] представлена информация о тестировании взрывоопасности АПГ в квазисферической камере объемом 1,138 м³. Исследовался свежий (не подвергавшийся облучению нейтронами) графит. Фракция графита с размером частиц менее 10 мкм составляла 90 % (масс.), средний размер частиц равнялся 5 мкм. В качестве источника зажигания использовался пи-

¹ Graphite decommissioning: Options for graphite treatment, recycling, or disposal, including a discussion of safety-related issues. EPRI, Palo Alto, CA, 2006. P. 1013091.

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

ротехнический заряд фирмы Fr. Sobbe GmbH [6] с запасом энергии 10 кДж (далее — «Sobbe 10 кДж»). Скачок давления от срабатывания такого источника зажигания в отсутствие пыли составлял $\Delta P_{ig} = 2,7$ кПа.

Ниже будут рассматриваться сглаженные графики эволюции абсолютного давления $P(t)$ и производной (dP/dt) для случая концентрации пыли $0,45$ кг/м³, при которой в стандартном испытании достигалось максимальное значение $P = 147$ кПа (рисунок). Присутствие пульсаций на реальных графиках с периодом около 3,5 мс позволяет с хорошей точностью определять моменты событий, характеризующих процесс в камере.

Согласно данным рисунка, начало выгорания источника зажигания отвечает моменту времени 0,8 с, начиная с которого происходит резкий рост как давления P в камере, так и его производной dP/dt . Для простоты: данный момент будет являться началом отсчета времени наступления последующих событий, а отвечающее этому моменту давление в камере (97 кПа) будет являться началом отсчета изменения давления ΔP , вызванного горением источника зажигания и графитовой пыли.

Для выбранных отсчетов времени t и изменения давления ΔP получим следующую информацию о процессе в камере. Максимальное значение $(dP/dt)_{max} = 3,8$ бар/с достигается через 20 мс и удерживается до 40 мс, после чего монотонно уменьшается до нуля к моменту 400 мс, когда достигается наибольшее значение скачка давления. Изменение давления ΔP в камере для выделенных выше момен-

тов времени 20, 40 и 400 мс составляет соответственно 3, 8 и 46 кПа.

Интерпретация результата исследования [13]

Для интерпретации перечисленных характеристик тестирования АПГ необходимы сведения об эволюции давления в камере $P_{ig}(t)$ для случая срабатывания «Sobbe 10 кДж» в отсутствие горючей пыли: продолжительность выгорания источника зажигания τ_{ig} и максимальное значение $(dP_{ig}/dt)_{max}$. Поскольку такая информация в [11, 12] отсутствовала, воспользуемся сведениями из [15]. В этой работе исследована зависимость $P_{ig}(t)$ в 1-м³ камере с источником зажигания «Sobbe 10 кДж» и получены следующие результаты: $\tau_{ig} \approx 20$ мс, $(dP_{ig}/dt)_{max} \approx 2\Delta P_{ig}/\tau_{ig}$.

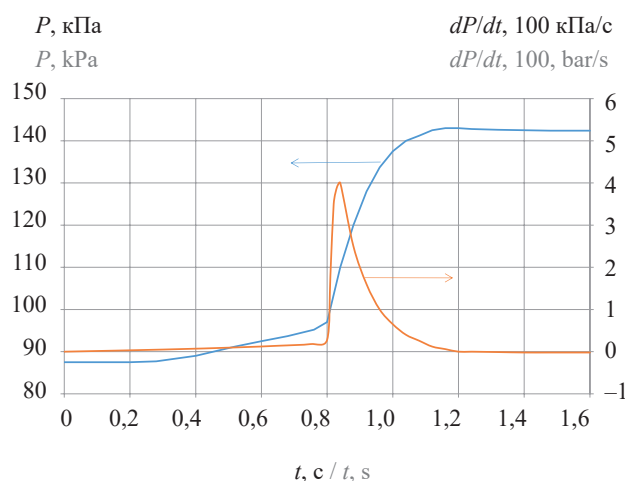
Возвращаясь к интерпретации приведенных выше результатов тестирования АПГ в камере объемом 1,138 м³, имеем возможность утверждать, что первые 20 мс изменения ΔP обусловлены в основном горением источника зажигания. Характерные значения $\Delta P = 3$ кПа и $dP/dt = 3,8$ бар/с близки к показателям горения «Sobbe 10 кДж» в отсутствие АПГ: $\Delta P_{ig} = 2,7$ кПа и 2,7 бар/с соответственно.

Изменение ΔP за время с 20 до 40 мс обусловлено распространением горения по АПГ с затухающей скоростью. Вывод о снижении скорости на этом промежутке времени основан на имеющем место постоянстве параметра $(dP/dt) \approx 3,8$ бар/с. Действительно, на начальном этапе распространение сферического пламени с постоянной скоростью в замкнутом объеме должно приводить к быстрому росту $(dP/dt) \propto t^2$ [16], что не наблюдается.

По аналогии с объяснением из предыдущего абзаца изменение ΔP за время с 40 до 400 мс также обусловлено распространением горения по АПГ с быстро затухающей скоростью ввиду резкого снижения параметра (dP/dt) с 3,8 бар/с до 0.

Таким образом, общий скачок давления в камере (47 кПа) обусловлен выгоранием АПГ с монотонно затухающей скоростью распространения пламени, что свидетельствует о негорючести АПГ. Первоначально возникшее пламя в АПГ затухает, не достигнув (ввиду малого скачка давления) стенки камеры. Последнее подтверждают оценки положения границы пламени в предположении сферической симметрии распространения и дополнительные опыты [11] по слежению за положением пламени с помощью гребенки термопар.

Поскольку затухание пламени наблюдалось уже при незначительном подъеме давления в камере (3–8 кПа), разумно предполагать негорючесть АПГ при нормальных условиях (давлении 100 кПа, температуре 25 °С). Последнее подтверж-



Сглаженные зависимости абсолютного давления P и его производной dP/dt от времени t для концентрации графита 450 г/м³ и энергии источника зажигания 10 кДж во взрывной камере объемом $1,138$ м³ (1 бар = 100 кПа) [11]

Smoothed dependences of absolute pressure P and its derivative dP/dt on time t for the graphite concentration of 450 g/m³ and the ignition source energy of 10 kJ (1 bar = 100 kPa) in a 1.138 m³ explosion chamber [11]

дают неудачные попытки реализовать горение АПГ в полукрытой трубе, предпринимавшиеся в [11].

Обсуждение полученных результатов

Согласно изложенной выше интерпретации результата тестирования АПГ в камере объемом 1,138 м³ с источником зажигания «Sobbe 10 кДж», АПГ не распространяет горение при нормальных условиях. Данный факт может показаться неувидимым, поскольку химический состав графита близок к химическому составу углей с низким содержанием летучих (антрацитов), взрывобезопасность которых в условиях *подземной* добычи хорошо известна³. Удивляет, однако, многократное (в 6 раз) отличие максимального значения скачка давления $\Delta P_{cp} = (\Delta P_{max} - \Delta P_{ig})$ продуктов горения графита и продуктов горения антрацита, также исследованного в крупномасштабной камере (см. таблицу).

Высокие (порядка 50 кПа) значения ΔP_{cp} , не связанные с характерной для взрывов пыли макроскопической неоднородностью распределения частиц горючего в пылевоздушном облаке (вблизи концентрационного предела распространения пламени), не являются частыми событиями в крупномасштабных испытаниях. Такое иногда случается вблизи границы «взрывается/не взрывается» по какому-либо влиятельному параметру испытаний. В частности, значения $\Delta P_{cp} \approx 50$ кПа наблюдались в 1-м³ взрывной камере при исследовании взрывоопасности пыли испанского лигнита, когда содержание кислорода в взрывзвеси оказалось на 0,5 % (об.) ниже значения показателя «минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК)» [18].

³ Graphite decommissioning: Options for graphite treatment, recycling, or disposal, including a discussion of safety-related issues. EPRI, Palo Alto, CA, 2006. P. 1013091.

Параметры тестирования графита [11] и антрацита [17]

Test parameters for graphite [11] and anthracite [17]

Дисперсный материал Dispersed material	Средний размер частиц, мкм Average particle size, μm	Концентрация пыли, кг/м ³ Dust concentration, kg/m ³	Объем взрывной камеры, м ³ Explosion chamber dimensions, m ³	Энергия источника зажигания, кДж Ignition source energy, kJ	ΔP_{cp} , кПа ΔP_{av} , kPa
Графит Graphite	5	0,435	1,138	10	44
Антрацит Anthracite	40	1,0	1	10	7
Антрацит Anthracite	40	1,0	1	30	20

В случае графита параметром, характеризующим приближение/удаление от упомянутой выше границы, может выступить размер частиц. Следуя [19], разумно полагать, что для любого горючего дисперсного материала существует масштаб измельчения (вплоть до размеров, сопоставимых с молекулярными), начиная с которого взрывзвесь такого материала становится взрывоопасной. Авторы [11] на основании исследований продуктов горения образцов графита с различным распределением частиц по размерам высказали предположение, что частицы графита с размером более 5...6 мкм не участвуют в процессе распространения пламени. Данное предположение не противоречит результатам настоящей работы.

Выводы

Выполнен анализ известных результатов тестирования взрывоопасности взрывзвеси пыли ядерного графита [11] в квазисферической камере объемом 1,138 м³. В рамках данного анализа использовались записи зависимостей давления и скорости его нарастания от времени. На основе таких записей проводилось сопоставление случая максимального проявления взрывоопасности пыли ядерного графита со случаем срабатывания 10 кДж источника зажигания в отсутствие взрывзвеси.

Показано, что инициированное источником зажигания горение графита происходит в режиме распространения пламени с монотонно убывающей скоростью. В связи с этим исследованную взрывзвесь ядерного графита с размером частиц, в основном, от 2 до 10 мкм следует считать взрывобезопасной при нормальных атмосферных условиях (давлении 100 кПа, температуре 25 °С).

Разумно полагать, что размер взрывоопасных частиц графита (т.е. способных распространять пламя в состоянии взрывзвеси при нормальных атмосферных условиях) меньше 5 мкм.

Данная работа показывает, что графики эволюции давления продуктов горения и скорости его нарастания являются наиболее информативны-

ми сведениями о горении аэрозвеси во взрывных камерах, особенно в случае низкой взрывоопасности пыли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Turkevich L.A., Dastidar A.G., Hachmeister Z., Lim M.* Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 295. Pp. 97–103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.069
2. *Turkevich L.A., Fernback J., Dastidar A.G., Osterberg P.* Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: screening of allotropes // *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 167. Pp. 218–227. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.010
3. *Sha D., Li Yu., Zhou X., Zhang J., Zhang H., Yu J.* Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. Issue 41. Pp. 27150–27155. DOI: 10.1021/acsomega.1c03803
4. *Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O.* Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
5. *Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al.* Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben // *SFTReport*. 1979. No. 2.2. 100 s.
6. *Полетаев Н.Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-л камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
7. *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
8. *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
9. *Полетаев Н.Л.* О взрывоопасности аэрозвеси меламина // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
10. *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
11. Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors. EPRI, Palo Alto, CA, 2007. P. 1014797.
12. *Phylaktou H.N., Andrews G.E., Mkpadi M., Willacy S., Wickham A.J.* The explosibility of graphite powder; the effects of ignition energy, graphite concentration and graphite age // 16th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, 13–17 Sept 2015, Nottingham. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281862384>
13. *Mintz K.J.* Problems in experimental measurements of dust explosions // *Journal of Hazardous Materials*. 1995. Vol. 42. Issue 2. Pp. 177–186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
14. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard «ISO 1m³ vessel». Systematic comparison and analysis of the discrepancies // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/J.JLP.2007.04.032
15. *Zhen G., Leuckel W.* Effects of ignitors and turbulence on dust explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1997. Vol. 10. Issue 5–6. Pp. 317–324. DOI: 10.1016/S0950-4230(97)00021-1
16. *Pu Y.K., Jia F., Wang S.F., Skjold T.* Determination of the maximum effective burning velocity of dust–air mixtures in constant volume combustion // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Issue 4–6. Pp. 462–469. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.036
17. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ chambers // *Combustion Science and Technology*. 1993. Vol. 87. Issue 1–6. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213

18. Поletaев 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
19. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. et al. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures // VTT Technical Research Centre of Finland. ESPOO Publ., 1999. Vol. 394. 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>

REFERENCES

1. Turkevich L.A., Dastidar A.G., Hachmeister Z., Lim M. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 295:97-103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.069
2. Turkevich L.A., Fernback J., Dastidar A.G., Osterberg P. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: screening of allotropes. *Combustion and Flame*. 2016; 167:218-227. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.010
3. Sha D., Li Yu., Zhou X., Zhang J., Zhang H., Yu J. Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust. *ACS Omega*. 2021; 6(41):27150-2715. DOI: 10.1021/acsomega.1c03803
4. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
5. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben. *SFTReport*. 1979; 2.2:100. (ger).
6. 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).
7. 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
8. 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
9. 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).
10. 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
11. *Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors*. EPRI, Palo Alto, CA, 2007; 1014797.
12. Phylaktou H.N., Andrews G.E., Mkpadi M., Willacy S., Wickham A.J. The explosibility of graphite powder; the effects of ignition energy, graphite concentration and graphite age. *16th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, 13–17 Sept 2015, Nottingham*. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281862384>
13. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1995; 42(2):177-186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/J.JLP.2007.04.032
15. Zhen G., Leuckel W. Effects of ignitors and turbulence on dust explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1997; 10(5-6):317-324. DOI: 10.1016/S0950-4230(97)00021-1
16. Pu Y.K., Jia F., Wang S.F., Skjold T. Determination of the maximum effective burning velocity of dust-air mixtures in constant volume combustion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20(4-6):462-469. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.036
17. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87(1-6):157-171. DOI: 10.1080/001022092-08947213
18. 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).

19. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. et al. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures. *VTT Technical Research Centre of Finland*. ESPOO Publ., 1999; 394:125. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>

*Поступила 16.02.2022, после доработки 14.03.2022;
принята к публикации 29.03.2022*

*Received February 16, 2022; Received in revised form March 14, 2022;
Accepted March 29, 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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 22–32
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(2):22-32

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК: 614.841.22

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32>

Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов

Наталья Ивановна Константинова¹✉, Андрей Владимирович Зубань¹,
 Алла Александровна Булгакова²

¹Всероссийский 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

²Центр сертификации и исследований «Метроном», Московская обл., г. Королев, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди легковоспламеняемых материалов, находящихся в помещениях жилых и общественных зданий, значительную долю занимают текстильные материалы и изделия (мягкая мебель, шторы, занавеси, постельные принадлежности, предметы декора и пр.), они в большой степени влияют при горении на скорость распространения пожара и образование его опасных факторов, поэтому вопросы совершенствования требований, регламентирующих пожаробезопасное их применение, являются весьма актуальными.

Проблематика вопроса. В настоящее время в России документом, регламентирующим пожарную безопасность мебельной продукции, является ТР ТС 025/2012 «О безопасности мебельной продукции». Однако отличия по процедуре испытаний и критериям оценки в указанных к нему стандартах не всегда позволяют объективно оценить воспламеняемость мягкой мебели и прогнозировать ее поведение при пожаре. Также отсутствует метод оценки воспламеняемости матрасов, а используемый в настоящее время метод испытаний ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5) не может дать корректную ее оценку, что искажает полученные результаты.

Целью настоящей работы являлись аналитические исследования зарубежной нормативной базы пожаробезопасного применения мягких элементов мебели в общественном и жилом секторе, экспериментальная оценка параметров воспламеняемости материалов и мягких мебельных композиций, а также разработка предложений по усовершенствованию методологического подхода к оценке пожарной опасности и применению матрасов в общественном и жилом секторе.

Результаты и их обсуждение. На основе аналитических исследований установлено, что за рубежом существует достаточно развитая нормативно-методологическая база, в определенной степени обеспечивающая пожаробезопасное применение предметов мягкой мебели в жилых и общественных помещениях зданий и сооружений.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования оценки воспламеняемости различных композиционных сочетаний матрасов и элементов мягкой мебели методами ГОСТ Р 53294–2009 (п.п. 4 и 5), позволившие выявить значительные расхождения в результатах испытаний композиций, что объясняется разницей в условиях теплового воздействия при испытаниях.

Выводы. Необходимо разработать и ввести в отечественную нормативную практику стандартный метод испытаний матрасов на воспламеняемость. Установить требования, ограничивающие применение легковоспламеняемых мягких мебельных элементов в местах с массовым пребыванием людей для снижения возможности распространения пожара при их возгорании и образовании опасных факторов.

Ключевые слова: мягкая мебельная продукция; воспламеняемость; требования пожаробезопасного применения; скорость распространения пожара; опасные факторы пожара

Для цитирования: Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А. Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 22–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32

✉ Константинова Наталья Ивановна, e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Improvement of a methodological approach to assessing the fire hazard of mattresses

Nataliya I. Konstantinova¹✉, Andrey V. Zuban¹, Alla A. Bulgakova²

¹All-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

²Non-Commercial Organization "Certification and Research Center "Metronom", Korolev, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Textile materials and products (upholstered furniture, curtains, bedding, decorative items, etc.) are among the most flammable materials in residential and public buildings. They largely affect the fire propagation speed and formation of dangerous fire factors in combustion. Therefore, the issues of improving the requirements governing their fire-safe use are particularly relevant.

Aims and purposes. Presently, the fire safety of furniture products is regulated by the Technical Regulations of the Customs Union 025/2012 "On safety of furniture products" in Russia. However, differences in testing procedures and evaluation criteria, demonstrated by the applicable standards, do not always allow objectively assessing the flammability of upholstered furniture products and predicting their behaviour in case of fire. There is also no method for assessing the flammability of mattresses, and the currently used testing method, set by GOST R 53294–2009 (p. 5) cannot ensure a correct assessment and, hence, its results are distorted. The purpose of this work is to conduct an analytical study on foreign regulatory frameworks for the fire-safe use of upholstered furniture elements in public and residential buildings, to make an experimental assessment of the flammability parameters of materials and upholstered furniture, as well as develop proposals for improving the methodological approach to the fire hazard assessment and the use of mattresses in public and residential buildings.

Results and discussion. The analytical studies have proven that fairly developed regulatory and methodological frameworks are in effect abroad. They ensure the fire-safe use of items of upholstered furniture on the premises of residential and public buildings and structures. Comparative experimental studies were conducted to assess the flammability of various composite combinations of mattresses and upholstered elements of furniture using GOST R 53294–2009 methods (p. 4 and 5), which identified large discrepancies between the test results due to the difference in the conditions of the thermal exposure in the course of testing.

Conclusions. It is necessary to develop and introduce a standard method of testing the flammability of mattresses into the domestic regulatory practice. It is advisable to set the requirements limiting the use of flammable elements of upholstered furniture in places of the mass presence of people to reduce fire propagation in case of ignition and formation of dangerous factors.

Keywords: upholstered furniture products; flammability; requirements of fire-safe use; fire propagation speed; fire hazards

For citation: Konstantinova N.I., Zuban A.V., Bulgakova A.A. Improvement of a methodological approach to assessing the fire hazard of mattresses. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):22-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32 (rus).

✉ Nataliya Ivanovna Konstantinova, e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Введение

Ежегодные статистические данные по пожарам свидетельствуют о значительном их количестве (более 38 %) в жилых и общественных зданиях. Наиболее пожароопасными объектами являются жилые здания, где происходит более 70 % от общего числа пожаров [1]. Основными причинами распространения пожара являются: невозможность осуществлять достаточный контроль за пожарной безопасностью жилищ, высокая плотность размещения горючей нагрузки (мебель, текстильные и отделочные материалы, бытовая техника) на единицу площади, а также многоэтажность зданий, обуславливающая возможность быстрого распространения огня по этажам.

На общественных объектах с массовым пребыванием людей (гостиницы, интернаты для инвалидов и престарелых людей, больницы) возможность возникновения и распространения пожара может быть обусловлена еще и наличием ограниченных в передвижении больных людей, а также отсутствием контроля в ночное время, что в свою очередь влияет на безопасную эвакуацию людей.

Одной из основных причин возникновения пожара всегда было и остается наличие человеческого фактора — из-за неосторожного обращения с огнем. Чаще всего пожары в зданиях происходят из-за возможности легкого воспламенения горючих

материалов и изделий маломощными источниками зажигания: сигарета, спичка, свеча, искра из-за неисправной электропроводки и т.п.

Среди легковоспламеняемых материалов, находящихся в помещениях жилых и общественных зданий, значительную долю могут занимать текстильные материалы и изделия (мягкая мебель, шторы, занавеси, постельные принадлежности, предметы декора и пр.), они в большой степени влияют при горении на скорость распространения пожара и образования его опасных факторов [2].

Вопросы изучения возможности воспламеняемости предметов мягкой мебели и текстиля в интерьере помещений, установление объективных методов ее оценки, а также разработки и совершенствования требований, регламентирующих пожаро-безопасное применение, являются весьма актуальными.

Проблематика вопроса

В настоящее время в России одним из основных документов, в том числе, регламентирующих пожарную безопасность мягкой мебели, является ТР ТС 025/2012 «О безопасности мебельной продукции», в поддержку которого разработан ряд национальных и межгосударственных стандартов. Необходимый уровень пожарной без-

опасности текстильных и кожаных материалов, применяемых в качестве обивочных при изготовлении мягких элементов изделий мебели для сидения и лежания, достигается следующими требованиями: для их изготовления не должны применяться легковоспламеняемые и относящиеся к чрезвычайно опасным по токсичности продуктам горения материалы. Однако методы оценки воспламеняемости, согласно перечню документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности мебельной продукции» (ТР ТС 025/2012), в полной мере не согласуются между собой, а по некоторым позициям продукции отсутствуют. В частности, отсутствует метод оценки воспламеняемости матрасов, и ни один из стандартных подходов испытаний мягкой мебели на них не может быть распространен. Тем не менее в настоящее время подтверждение соответствия матрасов осуществляется в добровольной форме — при испытании методом, оценивающим воспламеняемость мягких элементов мебели, но так как процедура испытаний предполагает использовать в качестве образца композиционное соединение сидения и спинки, в значительной степени искажающее реальную конструкцию указанного изделия, то результаты испытаний необъективны.

Целью настоящей работы являлись аналитические исследования зарубежной нормативной базы пожаробезопасного применения мягких элементов мебели в общественном и жилом секторе, экспериментальная оценка параметров воспламеняемости материалов и мебельных композиций, а также разработка предложений по усовершенствованию методологического подхода к оценке пожарной опасности и применению матрасов в общественном и жилом секторе.

Результаты исследований

Достаточно подробные результаты анализа причин и статистики пожаров, например, в жилых помещениях США, показывают, что в основном значительное количество летальных исходов и травм происходит из-за воспламенения мягкой мебели, матрасов и постельных принадлежностей. Серьезную опасность с точки зрения возможности возникновения пожара и отравления летучими продуктами термического разложения представляет курение в постели. Матрасы и постельное белье по-прежнему остаются основными предметами, воспламенение или тление которых происходит почти в трети пожаров, возникающих в спальнях и гостиных помещениях зданий, и почти половина

летальных исходов и травмирования людей связаны с этим [3, 4].

В мировой практике безопасность использования любых видов мягкой мебельной продукции и постельного белья в помещениях зданий регламентируется множеством нормативных документов. Большинство национальных и международных стандартов, устанавливающих требования и методы испытаний по воспламеняемости мягкой мебели, матрасов и постельных принадлежностей, применяются в основном для общественных зданий и сооружений с массовым пребыванием людей, но в некоторых развитых странах (США, Канада, Великобритания, Франция и Норвегия) регламентированы также правила оценки воспламеняемости матрасов и мягкой мебели в жилых помещениях [5, 6].

Одна из наиболее развитых нормативных баз, регламентирующих пожаробезопасное применение мягкой мебельной продукции, разработана в Великобритании.

В законодательный акт Великобритании № 1324 «О защите прав потребителей» входят правила, предусматривающие оценку пожарной опасности мебели и текстильных предметов интерьера. Требования по воспламеняемости продукции мягкой мебели, установленные рядом стандартов, включают использование различных методов испытаний, которые учитывают функциональное назначение изделия (мягкая мебель, сидения, матрасы, в том числе детские и пр.) и составляющих его компонентов (в основном, обивочного материала и наполнителя), а также различной природы и мощности источников зажигания.

Так, стандарт BS 7177 «Fire test to mattresses, divans and bed bases» определяет требования к устойчивости воспламенения матрасов, диванов и оснований кроватей, используемых в общественных зданиях, например, в гостиницах, больницах и других общественных местах при испытании в соответствии с методиками BSI BS EN 597-1:2016 «Furniture. Assessment of the ignitability of mattresses and upholstered bed bases — Ignition source: smouldering cigarette», BSI BS EN 597-2:1995 «Furniture — Assessment of the Ignitability of Mattresses and Upholstered Bed Bases — Part 2: Ignition Source: Match Flame Equivalent», BSI BS 6807-2006 «Methods of Test for Assessment of the Ignitability of Mattresses, Upholstered Divans and Upholstered Bed Bases with Flaming Types of Primary and Secondary Sources of Ignition», предусматривающих использование различных по теплопроизводительности источников зажигания и позволяющих классифицировать мягкую мебельную продукцию по степени пожарной опасности (низкая, средняя, высокая или очень высокая).

Британский стандарт BS 7176 «Specification for resistance to ignition of upholstered furniture for non-domestic seating by testing composites» устанавливает требования к устойчивости воспламенения мягкой мебели для сидения в общественных местах различного назначения путем использования национальных и международных методов испытаний BSI BS 5852-1-1979 «Fire Tests for Furniture Part 1: Methods of Test for the Ignitability by Smokers' Materials of Upholstered Composites for Seating 2» (источники зажигания — сигарета, пламя, эквивалентное пламени спички, или деревянные штабели), BSI BS EN 1021-1-2014 «Furniture — Assessment of the ignitability of upholstered furniture Part 1: Ignition source smouldering cigarette» и BSI BS EN 1021-2-2014 «Furniture — Assessment of the ignitability of upholstered furniture Part 2: Ignition source match flame equivalent» (источники зажигания — сигарета и пламя, эквивалентное пламени спички) в зависимости от условий ее использования.

Таким образом, проанализировав только основные нормативные документы, можно сделать вывод, что в Великобритании существует достаточно развитая методологическая база, в определенной степени гарантирующая пожаробезопасное использование различных предметов мягкой мебели в отличающихся по функциональному назначению помещениях и зданиях, для чего проводится обязательная оценка воспламеняемости как композиционного сочетания материалов, так и отдельных его составляющих.

Аналогичный подход к регламентированному применению по устойчивости к воспламенению предметов мягкой мебели разработан во многих развитых странах мира путем выполнения требований общенациональных стандартов на добровольной или обязательной основе. Кроме того, в ряде стран для производителей существуют требования по обязательной маркировке мягких мебельных изделий по устойчивости к воспламенению от различных источников зажигания или информации об ее отсутствии [7]. Пример маркировки матраца по результатам оценки воспламеняемости представлен на рис. 1 и означает, что данный вид продукции прошел испытания по тесту зажженной сигареты и пламени, эквивалентному пламени спички.

Рассмотрим некоторые вопросы пожарной опасности матрацев. По типу конструкции матрацы подразделяются на две основные группы: пружинные и не содержащие пружин, упругость которых обеспечивается применением различных набивочных материалов. Компоновка матрацев достаточно многообразна и зависит от назначения и требований по их эксплуатации. Основные материалы, ис-

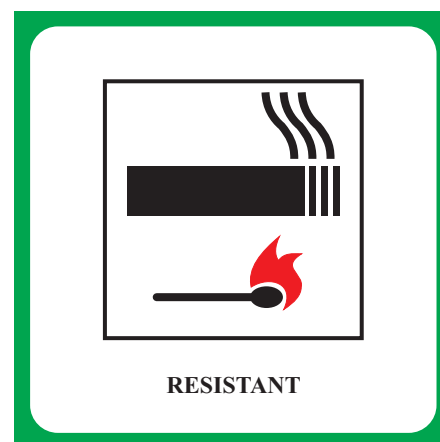


Рис. 1. Маркировка матраца, указывающая на устойчивость к воспламенению согласно тесту «зажженной сигареты» и пламени, эквивалентному пламени спички

Fig. 1. The marking of a mattress indicating its resistance to ignition pursuant to the “lit cigarette” test and the flame equivalent to that of a match

пользуемые для изготовления матрацев, — обивка, наполнитель, вспомогательные прокладочные элементы, и, как правило, чехлы.

На протяжении всего срока эксплуатации ткань для обивки матраца должна надежно защищать наполнитель, выдерживать ежедневные механические воздействия (трение) и многочисленные чистки. При этом, желательно, чтобы она сохранила презентабельный вид до конца срока службы наполнителя. В качестве обивочных материалов используются в основном текстильные материалы из натуральных или синтетических волокон достаточно широкого ассортимента, обеспечивающие прочность, износостойкость, устойчивость к истиранию, возможность чистки и эстетичность.

В число самых популярных материалов, используемых при изготовлении современных матрацев, в качестве набивки (наполнителя) входят эластичный пенополиуретан — вспененная смесь полиола и полиизоцианата, латекс — водная дисперсия различной природы полимеров, нетканые полотна из термоскрепленных полиэфирных волокон, а также ряд натуральных наполнителей: кокосовая койра, сизаль, шерсть и др. Часто для прокладок и обеспечения жесткости конструкции матраца используется термовойлок — смесь волокон натурального и синтетического происхождения, а прокладочные материалы, как правило, представляют собой нетканые материалы из полиэфирных или полипропиленовых волокон.

Следует отметить, что прогнозирование пожарной опасности достаточно сложного по конструкции компонентного сочетания материалов различной химической природы и по составу данного вида мебельной продукции проводится эксперименталь-

ным путем с использованием специальных регламентированных методов испытаний.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований оценки показателей пожарной опасности некоторых видов материалов, различных по составу и плотности (p), которые, как правило, входят в композиционный состав матрацев отечественного производства. С применением стандартного оборудования и средств измерений по ГОСТ 12.1.044–89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» (п.п. 4.18, 4.20) оценивался коэффициент дымообразования (D_{cp}), показатель токсичности продуктов горения H_{Cl50} (при этом фиксировались значения концентрации монооксида углерода CO, диоксида углерода CO₂), а также время самостоятельного горения (τ) для материалов наполнителей по ГОСТ Р 53294–2009 «Материалы текстильные. Постельные принадлежности. Мягкие

элементы мебели. Шторы. Занавеси. Методы испытаний на воспламеняемость» (п. 5), а для обивочных материалов (чехлов матрацев) по ГОСТ Р 51810–95 «Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация».

Как следует из приведенных экспериментальных данных, все наиболее широко применяемые материалы для изготовления матрацев являются легковоспламеняемыми (ЛВ), со временем самостоятельного горения, в значительной степени превышающим нормативное, с высокой дымообразующей способностью и высокоопасными по показателю токсичности продуктами горения, что влияет на возможность распространения пожара при их возгорании и образовании опасных факторов, блокирующих безопасную эвакуацию людей из помещений зданий.

Стендовые и крупномасштабные исследования, проводимые рядом зарубежных исследователей,

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований параметров пожарной опасности материалов, входящих в состав матрацев

Table 1. Results of experimental studies on the fire hazard parameters of mattress materials

Наименование и состав материала Type and composition of the material	ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.18, 4.20) GOST 12.1.044–89 (p. 4.18, 4.20)		Параметры воспламеняемости Flammability parameters					
	D_{cp} , м ² /кг D_{av} , м ² /kg	Токсичность продуктов горения Toxicity of combustion products			ГОСТ Р 53294 (п. 5) GOST R 53294 (p. 5)		ГОСТ Р 51810 GOST R 51810	
		H_{Cl50}	CO, мг/г CO, mg/g	CO ₂ , мг/г CO ₂ , mg/g	τ , с τ , s	Класс Class	τ , с τ , s	Класс Class
Латекс на основе каучука, $p = 30$ г/см ³ Rubber-based latex, $p = 30$ g/cm ³	780	38	117	716	> 120	ЛВ HF	–	–
Термовойлок (ПЭ — 50 %, Ш — 50 %), $p = 300$ г/м ² Thermal felt (polyester — 50 %, wool — 50 %), $p = 300$ g/m ²	980	29	214	1358	> 120	ЛВ HF	–	–
Полотно нетканое (термоскрепленные ПЭ волокна — 100 %), $p = 550$ г/м ² Non-woven fabric (heat-bonded polyester fibers — 100 %), $p = 550$ g/m ²	1250	33	189	1085	> 120	ЛВ HF	–	–
Эластичный ППУ, $p = 50$ г/см ³ Elastic polyurethane foam, $p = 50$ g/cm ³	755	30	174	1054	> 120	ЛВ HF	–	–
Ткань обивочная, 100 % ПЭ, $p = 260$ г/м ² Upholstery fabric, 100 % polyester, $p = 260$ g/m ²	1100	33	132	1341	–	–	180	ЛВ HF
Тик матрасный, 100 % хлопок, $p = 200$ г/м ² Mattress teak, 100 % cotton, $p = 200$ g/m ²	650	36	129	737	–	–	150	ЛВ HF
Жаккардовая ткань для матрацев (65 % ПЭ + + 35 % ХБ), $p = 200$ г/м ² Jacquard fabric for mattresses (65 % polyester + + 35 % cotton), $p = 200$ g/m ²	1350	31	198	1023	–	–	135	ЛВ HF

выявили влияние множества факторов на процесс воспламенения и последующего горения матрацев. Моделировались возможные сценарии пожара по причине возгорания от непотушенной сигареты или зажженной спички различных по химической природе волокон обивочных материалов и наполнителей, входящих в различные конструкции и размеры матрацев, выявлены опасные концентрации выделения целого ряда токсичных летучих продуктов горения, значительные величины скорости тепловыделения и распространения пламени [8–10]. Основное внимание уделялось установлению требований по регламентации пожаробезопасного использования матрацев в помещениях жилых и общественных зданий и возможности применения определенных методов испытаний на устойчивость к воспламенению [6, 10–12].

В нашей стране специальных исследований по оценке пожарной опасности матрацев до настоящего времени не проводилось. В работе [13] были проведены крупномасштабные испытания и моделирование возникновения и развития пожара при использовании в интерьере помещения гостиничного номера неогнезащищенных текстильных материалов. Анализируя динамику развития пожара по изменению величины параметров опасных факторов (потеря видимости, связанная с высокой дымообразующей способностью материалов, выход токсичных продуктов горения, температура воздуха, воздействие теплового потока), можно сделать вывод, что процесс интенсивно прогрессирует, в результате чего опасные условия для людей достигаются уже на второй минуте. Применение огнезащищенных текстильных материалов при аналогичных условиях моделирования пожара обеспечивает увеличение времени наступления опасных условий для людей до 10 мин, в результате чего достигается условие, при котором обеспечивается эвакуация людей.

Специалистами неоднократно рассматривались вопросы комплексной оценки пожарной опасности текстильных и кожевенных материалов в зависимости от функционального назначения и области применения [14, 15].

Для снижения воспламеняемости элементов мягкой мебели разработано множество подходов, учитывающих применение огнезащищенных материалов и устройства их в конструкции матраца определенным специальным образом [16–18].

Однако основной проблемой обеспечения пожаробезопасного их применения как в жилом, так и в общественном секторе в нашей стране является отсутствие стандартной методики испытаний и критериев оценки, и по этой причине производители матрацев получают подтверждение их соответствия устойчивости к воспламенению только в добровольном порядке по стандартной методике испытаний

мягкой мебели согласно ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5) (образец матраца формируют в виде макета сидения), используя только «сигаретный тест».

С целью определения степени объективности оценки воспламеняемости матрацев методом ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5) были проведены сравнительные экспериментальные исследования с использованием стандартного оборудования и средств измерений методики ГОСТ Р 53294–2009 (п. 4.4.18), предназначенной для испытаний постельных принадлежностей.

В табл. 2 представлены результаты проведенных сравнительных экспериментальных исследований воспламеняемости образцов некоторых композиционных сочетаний матрацев с одним слоем наполнителя, выполненных по вышеуказанным методикам при использовании в качестве источников зажигания сигареты и газовой горелки. Исследования проводились на экспериментальных базах испытательной лаборатории ФГБУ ВНИИПО МЧС России и Автономной некоммерческой организации «Центр сертификации и исследований «МЕТРОНОМ». Для указанных исследований были выбраны различные по составу волокон (хлопчатобумажных — ХБ, полиэфирных — ПЭ, полиэфирных огнезащищенных — ПЭ FR) поверхностной плотности и степени огнезащиты ткани чехлов на матрацы и горючие наполнители на основе вспененного полиуретана (ППУ) и полиэфирных (ПЭ) волокон толщиной 50 мм.

Из данных табл. 2 следует, что образец композиции матрацев № 2 с использованием огнезащищенной хлопчатобумажной ткани (ХБ) съемного чехла в сочетании с горючим наполнителем, классифицируемой как трудновоспламеняемая по методике испытаний ГОСТ Р 53294–2009 (п. 4.4.18), не прошел испытания и относится к легковоспламеняемым по методу ГОСТ 53294–2009 (п. 5) для элементов мягкой мебели (из-за сквозного прогара термopластичной полиэфирной составляющей ткани чехла и дальнейшего самостоятельного горения наполнителя). Аналогичные результаты испытаний получены для образцов композиций № 3–5. Кроме того, согласно данным табл. 2, существенным является неправомерность использования только теста «тлеющей сигареты» без оценки воздействия пламени, эквивалентного пламени спички, не позволяющая объективно оценить устойчивость к воспламенению мягкой мебели от маломощных источников зажигания, спрогнозировать возможность распространения пожара, а значит, в ряде случаев для обивки мебели допускается использование материалов из легковоспламеняемых полимеров. Так, образцы композиций № 2–5 при испытании согласно ГОСТ 53294–2009 (п. 5), относящиеся к трудновоспламеняемым (ТВ) по тесту

Таблица 2. Сравнительные экспериментальные данные испытаний по воспламеняемости композиций матрасов согласно методикам ГОСТ Р 53294–2009 (п.п. 4 и 5)

Table 2. Comparative experimental test data on flammability of mattress compositions according to GOST R 53294–2009 (p.p. 4 and 5)

Номер образца Specimen No.	Описание образцов композиций матрасов, состав, плотность (p) и классификация по воспламеняемости входящих в их состав материалов Description of specimens of mattress compositions, structure, density (p) and flammability classification of their components	Источник зажигания Ignition source	ГОСТ Р 53294–2009 (п. 4) GOST R 53294–2009 (p. 4)	ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5) GOST R 53294–2009 (p. 5)
1	Съемный чехол — жаккардовая ткань (80 % ПЭ + 20 % ХБ), $p = 200 \text{ г/см}^2$ — ЛВ Чехол ткань (бязь 100 % ХБ), $p = 150 \text{ г/см}^2$ — ЛВ Наполнитель — эластичный ППУ, $p = 35 \text{ г/см}^3$ — ЛВ Removable case — jacquard fabric (80 % Polyester + 20 % cotton), $p = 200 \text{ г/см}^2$ — HF Case fabric (calico 100 % cotton), $p = 150 \text{ г/см}^2$ — HF Filler — elastic polyurethane foam, $p = 35 \text{ г/см}^3$ — HF	Сигарета Cigarette	TB DF	ЛВ HF
		Горелка Burner	ЛВ HF	ЛВ HF
2	Съемный стеганный чехол — огнезащищенная ткань (100 % ХБ), $p = 160 \text{ г/см}^2$ — ТВ Чехол — ткань (50 % ПЭ + 50 % ХБ), $p = 160 \text{ г/см}^2$ — ЛВ Наполнитель — термоскрепленное ПЭ волокно, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — ЛВ Removable quilted case — fireproof fabric (100 % cotton), $p = 160 \text{ г/см}^2$ — DF Fabric case (50 % Polyester + 50 % cotton), $p = 160 \text{ г/см}^2$ — HF Filler — heat-bonded polyester fibers, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — HF	Сигарета Cigarette	TB DF	TB DF
		Горелка Burner	TB DF	ЛВ HF
3	Чехол — 100 % ПЭ FR, $p = 200 \text{ г/см}^2$ ТВ Наполнитель — эластичный ППУ, $p = 35 \text{ г/см}^3$ ЛВ Case — 100 % Polyester FR, $p = 200 \text{ г/см}^2$ DF Filler — elastic polyurethane foam, $p = 35 \text{ г/см}^3$ HF	Сигарета Cigarette	TB DF	TB DF
		Горелка Burner	TB DF	ЛВ HF
4	Чехол — ткань (100 % ПЭ FR), $p = 200 \text{ г/см}^2$ — ТВ Наполнитель — термоскрепленное ПЭ волокно, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — ЛВ Case — fabric (100 % Polyester FR), $p = 200 \text{ г/см}^2$ — DF Filler — heat-bonded polyester fibers, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — HF	Сигарета Cigarette	TB DF	TB DF
		Горелка Burner	TB DF	ЛВ HF
5	Съемный стеганный чехол — ткань (ПЭ FR — 60 % + ПЭ — 40 %), $p = 260 \text{ г/см}^2$ — ТВ Чехол — ткань (тик — 100 % ХБ), $p = 150 \text{ г/см}^2$ — ЛВ Наполнитель — термоскрепленное ПЭ волокно, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — ЛВ Removable quilted case — fabric (Polyester FR — 60 % + Polyester — 40 %), $p = 260 \text{ г/см}^2$ — DF Case — fabric (calico — 100 % cotton), $p = 150 \text{ г/см}^2$ — HF Filler — heat bonded polyester fibers, $p = 600 \text{ г/см}^3$ — HF	Сигарета Cigarette	TB DF	TB DF
		Горелка Burner	TB DF	ЛВ HF

«сигарета», классифицируются как легковоспламеняемые (ЛВ) при воздействии пламени газовой горелки, эквивалентной пламени спички.

Значительные расхождения в результатах испытаний композиций элементов мягкой мебели двумя указанными методами объясняются разницей в создании условий теплового воздействия.

Рассмотрим качественную физическую модель воздействия тепловых потоков от пламенного источника зажигания на испытуемый образец матраса в соответствии с методикой ГОСТ Р 53294–2009 (п. 4) и на образец сидения и спинки элемента мягкой мебели согласно ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5). В обоих случаях основным источником теплового воздействия на испытуемые образцы, исходя из классического представления структуры пламени, является пламенная зона источника зажигания. В случае расположения источника зажигания на горизонтальной поверхности матраса основные составляющие теплового потока от пламени — конвективная, кондуктивная и большая часть радиационной (до 60 %), диссипируют в окружающую среду, не оказывая существенного воздействия на испытуемый образец (рис. 2). При проведении испытаний с образцами макета сидения источник зажигания расположен в непосредственной близости от вертикальной поверхности и, как следует из рис. 2, на испытуемую поверхность воздействуют конвективная, кондуктивная и радиа-

ционная составляющие теплового потока от пламенной зоны, что существенно облегчает формирование очага горения испытуемого образца мягкой мебели. Кроме того, скорость распространения горения по вертикальной поверхности образца может превышать в 1,5–2 раза скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности этого же образца, и горение по вертикальной плоскости за счет радиационной составляющей оказывает существенное влияние на воспламенение горизонтальной поверхности образца [19].

Таким образом, экспериментальные исследования установили существенную разницу в отношении классификации по оценке воспламеняемости от стандартных маломощных источников зажигания, подтверждающих необходимость использования объективной методики, учитывающей функциональное назначение изделий мягкой мебели.

Выводы

В результате аналитических и экспериментальных исследований в настоящей работе удалось установить следующее.

За рубежом существует достаточно развитая нормативно-методологическая база, в определенной степени обеспечивающая пожаробезопасное применение предметов мягкой мебели в жилых и общественных помещениях зданий и сооружений. Согласно законодательству наиболее развитых стран, потребители обеспечены правом на информацию о воспламеняемости мебельной продукции, в том числе по обязательной специальной маркировке ее производителем.

В нашей стране не применяется скоординированная система оценки пожарной опасности мягкой мебельной продукции, требования по подтверждению соответствия ее в области пожарной безопасности разрознены, не согласуются между собой или отсутствуют, в частности, для матрасов.

Используемые материалы для изготовления матрасов являются легковоспламеняемыми, с высокой дымообразующей способностью и высокоопасными по показателю токсичности продуктов горения, что влияет на возможность распространения пожара в помещении при их возгорании и образовании его опасных факторов, блокирующих безопасную эвакуацию людей.

Для обеспечения пожарной безопасности указанной мягкой мебельной продукции необходимо применять композиции пониженной горючести с сохранением эксплуатационных характеристик изделия, для чего следует разработать объективную методику, учитывающую функциональные особенности применения матрасов. За основу разработки методов испытаний матрасов на воспламеняемость

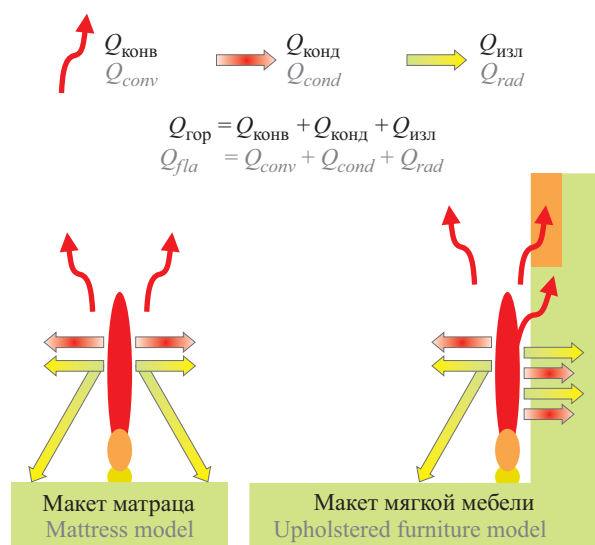


Рис. 2. Физическая модель теплового воздействия источника зажигания на объект испытаний: $Q_{гор}$ — тепловой поток от пламени; $Q_{конв}$ — конвективная составляющая теплового потока; $Q_{конд}$ — кондуктивная составляющая теплового потока; $Q_{изл}$ — излучающая составляющая теплового потока

Fig. 2. The physical model of the thermal effect of an ignition source on the tested object: Q_{fla} — heat flow from the flame; Q_{conv} — convective component of the heat flow; Q_{cond} — conductive component of the heat flow; Q_{rad} — radiating component of the heat flow

и критериев оценки целесообразно использовать аналогичные действующие зарубежные национальные стандарты.

Следует обеспечить потребителя информацией о степени воспламеняемости мягкой мебели, для чего необходима маркировка производителем выпускаемой пожаробезопасной продукции, возможно, в рамках проведения подтверждения со-

ответствия требованиям нормативных документов.

Целесообразно установить требования, ограничивающие применение легковоспламеняемых от маломощных источников зажигания мягких мебельных элементов в местах с массовым пребыванием людей (гостиницы, интернаты для престарелых и малоподвижных людей, больницы, hostels и т.п.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полехин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2021. 112 с.
2. Константинова Н.И., Ерофеев О.О. Пожаробезопасное применение мягкой мебели в зданиях и сооружениях // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. году науки и технологии. М., 2021. С. 530–533.
3. Nazaré S., Davis R.D., Butler K. Assessment of factors affecting fire performance of mattresses: a review // Fire Science Reviews. 2012. Vol. 1. Issue 1. Pp. 1–27. DOI: 10.1186/2193-0414-1-2
4. Troitzsch J.H. Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34. Issue 3. Pp. 171–198. DOI: 10.1177/0734904116636642
5. Fire safety of furniture and furnishings in the home. A Guide to the UK Regulations. 2009. 52 p.
6. Pitts W.M. Summary and conclusions of a workshop on quantifying the contribution of flaming residential upholstered furniture to fire (NIST TN 1757) losses in the United States. Gaithersburg, MD : Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, 2012. DOI: 10.6028/NIST.TN.1757
7. Lock A. Memoranda on full-scale upholstered furniture testing, 2014–2015. Linda Fansler, Division of Engineering, 2016.
8. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: full-scale furniture and flashover experiments // Fire & Materials. San Francisco. CA, 2013.
9. Guillaume E., Didieux F., Thiry A., Bellivier A. Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment // Fire Safety Journal. 2014. Vol. 70. Pp. 81–97. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.014
10. Babrauskas V. Upholstered furniture and mattresses. Fire Protection Handbook. Edition: 20. Chapter: Sec. 6, Chapter 6. National Fire Protection Association. 2008. Pp. 103–128.
11. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: Full-scale furniture and flashover experiments. Fire & Materials. San Francisco, CA, 2013.
12. Smith C.L. Preliminary regulatory analysis of a draft proposed rule to address cigarette and small open flame ignitions of upholstered furniture. Directorate for Economic Analysis, US CPSC, 2005.
13. Константинова Н.И. Огнезащита текстильных материалов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2004. 277 с.
14. Смирнов Н.В., Константинова Н.И., Семибратова И.С., Терешина Н.А., Поединцев Е.А. Комплексная оценка пожарной опасности текстильных и кожевенных материалов : рекомендации. М. : ВНИИПО, 2014. 28 с.
15. Константинова Н.И., Еремина Т.Ю., Николаева Е.А. Особенности выбора огнезащитных составов для текстильных материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 9. С. 17–25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.17-25
16. Hall J.R. Estimating fires when a product is the primary fuel but not the first fuel, with an application to upholstered furniture // Fire Technology. 2015. Vol. 51. Issue 2. Pp. 381–391. DOI: 10.1007/s10694-014-0391-8
17. Ohlemiller T.J., Shields J.R., McLane R.A., Gann R.G. Flammability assessment methodology for mattresses (NISTIR 6497). NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2000. DOI: 10.6028/NIST.IR.6497 (Accessed: November 21, 2021).
18. Константинова Н.И., Еремина Т.Ю., Кузнецова Н.Н. Разработка огнезащищенных текстильных материалов безопасных при соприкосновении с кожей человека // Химические волокна. 2019. № 2. С. 54–59.
19. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.

REFERENCES

1. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Kozlov A.A., Firsov A.G., Sibirko V.I., Goncharenko V.S. et al. *Fires and fire safety in 2020 : Statistical collection*. D.M. Gordienko (ed.). Moscow, VNIPO, 2021; 112. (rus).
2. Konstantinova N.I., Erofeev O.O. Fireproof application of soft furniture in buildings and structures. *Proceedings of the Actual Problems of Fire Safety : Materials of the XXXIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the year of science and technology*. Moscow, 2021; 530-533. (rus).
3. Nazaré S., Davis R.D., Butler K. Assessment of factors affecting fire performance of mattresses : a review. *Fire Science Reviews*. 2012; 1(1):1-27. DOI: 10.1186/2193-0414-1-2
4. Troitzsch J.H. Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures. *Journal of Fire Sciences*. 2016; 34(3):171-198. DOI: 10.1177/0734904116636642
5. *Fire safety of furniture and furnishings in the home. A Guide to the UK Regulations*. 2009; 52.
6. Pitts W.M. *Summary and conclusions of a workshop on quantifying the contribution of flaming residential upholstered furniture to Fire (NIST TN 1757) losses in the United States*. Gaithersburg, MD, Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, 2012. DOI: 10.6028/NIST.TN.1757
7. Lock A. *Memoranda on full-scale upholstered furniture testing, 2014-2015*. Linda Fansler, Division of Engineering, 2016.
8. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: full-scale furniture and flashover experiments. *Fire & Materials*. San Francisco. CA, 2013.
9. Guillaume E., Didieux F., Thiry A., Bellivier A. Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment. *Fire Safety Journal*. 2014; 70:81-97. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2014.08.014
10. Babrauskas V. Upholstered furniture and mattresses. *Fire Protection Handbook. Edition: 20. Chapter: Sec. 6, Chapter 6*. National Fire Protection Association. 2008; 103-128.
11. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: Full-scale furniture and flashover experiments. *Fire & Materials*. San Francisco, CA, 2013.
12. Smith C.L. *Preliminary regulatory analysis of a draft proposed rule to address cigarette and small open flame ignitions of upholstered furniture*. Directorate for Economic Analysis, US CPSC, 2005.
13. Konstantinova N.I. *Fire protection of textile materials : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2004; 277. (rus).
14. Smirnov N.V., Konstantinova N.I., Semibratova I.S., Tereshina N.A., Poedincev E.A. *Comprehensive fire hazard assessment of textile and leather materials : Recommendations*. Moscow, VNIPO, 2014; 28. (rus).
15. Konstantinova N.I., Eremina T.Yu., Nikolaeva E.A. Special aspects of fire retardant composition selection for textile materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(9):17-25. (rus).
16. Hall J.R. Estimating fires when a product is the primary fuel but not the first fuel, with an application to upholstered furniture. *Fire Technology*. 2015; 51(2):381-391. DOI: 10.1007/s10694-014-0391-8
17. Ohlemiller T.J., Shields J.R., McLane R.A., Gann R.G. *Flammability assessment methodology for mattresses (NISTIR 6497)*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2000. DOI: 10.6028/NIST.IR.6497 (Accessed: November 21, 2021).
18. Konstantinova N.I., Eremina T.Yu., Kuznetsova N.N. Development of fire-proof textile materials that are safe in contact with human skin. *Chemical fibers*. 2019; 27(2):54-59. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.17-25 (rus).
19. Molchadsky I.S. *Fire in a Room*. Moscow, VNIPO, 2005; 455. (rus).

Поступила 11.03.2022, после доработки 31.03.2022;

принята к публикации 04.04.2022

Received March 11, 2022; Received in revised form March 31, 2022;

Accepted April 4, 2022

Информация об авторах

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; Scopus Author ID: 55847911600; Researcher ID: AAB-9575-2019; ORCID: 0000-0002-7799-2058, e-mail: avzuban@mail.ru

БУЛГАКОВА Алла Александровна, директор, Центр сертификации и исследований «Метроном», Россия, Московская область, г. Королев, пр-т Космонавтов, 17А; ORCID: 0000-0003-4078-2548; e-mail: metronom_aa@mail.ru

Вклад авторов:

Константинова Н.И. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зубань А.В. — концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Булгакова А.А. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 774306; Scopus Author ID: 55847911600; Researcher ID: AAB-9575-2019; ORCID: 0000-0002-7799-2058, e-mail: avzuban@mail.ru

Alla A. BULGAKOVA, Director, Non-Commercial Organization Certification and Research Center “Metronom”, Prospekt Kosmonavtov, 17A, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4078-2548; e-mail: metronom_aa@mail.ru

Contribution of the authors:

Nataliya I. Konstantinova — scientific management, research concept, methodology development, participation in development of curricula and their implementation, writing the draft, final conclusions.

Andrey V. Zuban — research concept, methodology development, follow-on revision of the text, final conclusions.

Alla A. Bulgakova — methodology development, follow-on revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 33–40
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2022; 31(2):33-40

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 681.5

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.33-40>

Расчет регламентированного количества выносных датчиков газосигнализаторов вокруг открытых установок нефтеперерабатывающих заводов прямоугольной формы

Илья Вадимович Самарин ✉, Алексей Вячеславович Крючков,
Андрей Юрьевич Строгонов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечена значимость датчиков сигнализаторов до взрывных концентраций в процессе обеспечения необходимого уровня пожарной безопасности (ПБ) на пожаровзрывоопасных объектах нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Обоснована важность процедуры технического обслуживания (ТО) приборов первого (нижнего) уровня информирования, входящих в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), установленных вокруг открытых технологических установок (ОТУ) НПЗ.

Теоретические основы. Утверждается, что два встречно идущих подпроцесса (разрушительный и созидательный (восстановительный)) обеспечения ПБ могут описать снижение эффективности подсистем АСУТП по контролю уровня ПБ, а также их восстановление на объектах НПЗ. Дисциплина ТО газосигнализаторов представлена в виде дискретного созидательного подпроцесса. Показана связь пространственного расположения датчиков стационарных газосигнализаторов и возможности расчета их числа в зависимости от периметра открытой установки.

Результаты исследования. С целью математического описания процедуры ТО стационарных газосигнализаторов в работе проведена расчетная оценка зависимости количества их выносных датчиков от периметра ОТУ НПЗ прямоугольной формы, вокруг которой они установлены, а также от регламентированных расстояний установки датчиков.

Выводы. Полученная в работе оценка отражает особенности установки датчиков газосигнализаторов любых типов по классификации в соответствии с физическими методами анализа. Сделан вывод, что данные о периметре ОТУ могут помочь в расчете количества рядов для установки приборов, длины каждого из рядов, нормативно установленного количества ВД газосигнализаторов в каждом из рядов.

Ключевые слова: нефтеперерабатывающий завод; автоматизированная система управления технологическими процессами; пожарная безопасность; газосигнализатор; стационарный газосигнализатор; открытая технологическая установка; техническое обслуживание

Для цитирования: Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Расчет регламентированного количества выносных датчиков газосигнализаторов вокруг открытых установок нефтеперерабатывающих заводов прямоугольной формы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 33–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.33-40

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

The calculation of the regulated number of remote sensors of gas analyzers surrounding rectangular outdoor facilities at oil refineries

Ilya V. Samarin ✉, Alexey V. Kryuchkov, Andrey Yu. Strogonov

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

ABSTRACT

Introduction. The authors emphasize the importance of pre-explosive concentration sensors, that ensure the required fire safety (FS) at fire/explosion hazardous facilities of oil refineries. The authors substantiate the impor-

tance of maintenance procedures for first-level alarming devices that are part of automated process control systems (APCS) installed around outdoor facilities of refineries.

Theoretical fundamentals. The authors argue that two counter-running subprocesses (destructive and creative (restorative)), that ensure fire safety, can describe a decrease in the efficiency of APCS subsystems in the FS monitoring, as well as their restoration at refinery facilities. The proper maintenance of gas detectors is presented as a discrete creative subprocess. The authors demonstrate a relation between the spatial location of sensors of stationary gas analyzers and the computability of their number, depending on the outdoor facility perimeter.

Research results. To mathematically describe the maintenance procedure applied to stationary gas analyzers, the authors assess the dependence between the number of remote detectors, the perimeter of the rectangular outdoor unit, around which they are installed at a refinery, and the prescribed distance between the sensors.

Conclusion. This assessment conveys the features of installation of gas detectors of any type depending on their classification based on physical methods of analysis. A conclusion is drawn that the perimeter data can help to calculate the number of rows for the installation of devices, the length of each row, the prescribed number of gas detectors in each row.

Keywords: oil refinery; automated process control system; fire safety; gas analyzer; stationary gas analyzer; outdoor production facility; maintenance

For citation: Samarina I.V., Kryuchkov A.V., Stroganov A.Yu. The calculation of the regulated number of remote sensors of gas analyzers surrounding rectangular outdoor facilities at oil refineries. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):33-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.33-40 (rus).

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

Введение

Способы информирования сотрудников дежурных смен о состоянии среды в зоне их ответственности относятся к наиболее значимым для предотвращения пожаров и взрывов на объектах нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) мерам [1]. Практики предупреждения, наискорейшего обнаружения и устранения источника возгорания на предприятиях повышенной пожарной опасности непрерывно совершенствуются [2–4]. В качестве первого звена информирования в системах раннего обнаружения и предупреждения пожаров и взрывов на таких объектах выступают датчики газосигнализаторов. Их готовность к использованию становится ключевым фактором обеспечения пожарной безопасности (ПБ) [5], особенно с учетом ограниченного особыми условиями ресурса [6]. На данный фактор в свою очередь довольно сильно влияет процедура технического обслуживания (ТО) приборов первого (нижнего) уровня информирования, входящих в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), установленных вокруг открытых технологических установок (ОТУ). Под ОТУ будем понимать оборудование промышленных предприятий, размещаемое вне производственных зданий (на открытых площадках) [7]. Для целей исследования выбран термохимический тип газосигнализаторов, работающих по принципу определения энергии окисляемого ими газа с помощью катализатора [8]. У данных приборов есть ряд преимуществ. Одним из них является стоимость, так как существует потребность использования на объектах НПЗ большого количества таких приборов. Вопрос экономии средств всегда актуален. Термохимические газосигнализаторы наиболее приемлемы по данному

параметру [9, 10]. Среди многих газосигнализаторов, применяемых для определения горючих паров или газов, термохимический метод получил наибольшее распространение в мировой практике [11]. В работе [12] при описании структуры автоматизированной системы управления противопожарной защитой нефтеперерабатывающих производств (на примере МНПЗ) для контроля аварийной загазованности на открытых технологических площадках рекомендовано использовать стационарные термохимические многоканальные газосигнализаторы, а именно СТМ-20 (сегодня заводом ФГУП СПО «Аналитприбор» выпускаются усовершенствованные модели). Однако помимо описанных выше и некоторых других преимуществ [13–15], термохимический принцип работы данных приборов измерения дозврывоопасных концентраций горючих газов и паров имеет в том числе и ряд недостатков. Например, небольшой срок службы, измерение наличия целевого газа только в присутствии кислорода, необходимость частой калибровки нуля и пороговых значений, высокая вероятность выхода из строя в связи с перенасыщением определяемым газом, а также низкая чувствительность и быстродействие [16–18].

Статья посвящена получению расчетных формул для определения числа датчиков газосигнализаторов, устанавливаемых вокруг ОТУ на объектах НПЗ в зависимости от периметра ОТУ, а именно ОТУ прямоугольной формы. Для достижения этой цели рассмотрено пространственное расположение датчиков с учетом требований к установке сигнализаторов и газосигнализаторов (ТУ-газ-86). Для удобства геометрических расчетов принимаются во внимание различные расположения линий газосигнализаторов вокруг прямоугольной ОТУ.

Теоретические основы

Дисциплина ТО представляет собой дискретно изменяемый процесс, состоящий из последовательности операций. Снижение эффективности подсистем АСУТП по контролю уровня ПБ, а также их восстановление на объектах НПЗ может быть описано в виде двух встречно идущих подпроцессов: разрушительного и созидательного [19]. Первый представляет собой последовательность опасных событий. Второй — последовательность управляющих воздействий и вызванных ими событий по восстановлению системы, которой управляет субъект управления. События разрушительного подпроцесса при обеспечении надежной работы подсистемы оповещения о пожаре связаны с появлением регистрируемых дежурной сменой данных об отклонении в работе датчиков от нормированных значений [20]. Процесс ТО газосигнализаторов представляет собой составную часть созидательного (восстановительного) подпроцесса.

Для математического описания процесса ТО стационарных газосигнализаторов, устанавливаемых вокруг ОТУ на объектах НПЗ, необходимо рассмотреть их пространственное расположение, которое позволит посчитать их количество в зависимости от периметра открытой установки. В этом смысле наиболее важными представляются два параметра: число выносных датчиков (ВД) в зависимости от величины периметра установки и регламентное время их ТО. Расчет регламентного времени проведения мероприятий ТО датчиков газосигнализаторов на объектах НПЗ ремонтными бригадами, состав которых известен, проведен в работе [21]. В данной работе рассчитаем число ВД в зависимости от периметра открытой установки.

В документе ТУ-газ-86¹ указан «примерный порядок расположения датчиков сигнализаторов дозрывных концентраций на открытой установке шириной» до 30 метров (Приложение 4) и более 30 метров (Приложение 5). Расстояния в метрах показывают геометрию их расположения. Рис. 1 (Приложение 5)¹ показывает, как в последнем случае должны располагаться датчики. Точками на рис. 1 указаны датчики-сигнализаторы, а штриховкой — мертвые зоны. В соответствии с рекомендацией¹ их не следует учитывать при расчете мест установки датчиков и их общего количества на открытой установке. Зарубежные авторы в [22] также утверждают, что действующие в отрасли стандарты и правила предоставляют только общие качественные рекомендации по установке датчиков, которые основаны на минимальном использовании данных и не учитывают присущую сложность их размещения.

Результаты исследования

Оценим характер зависимости количества устанавливаемых ВД от периметра ОТУ, вокруг которой они установлены. Будем считать, что размер ОТУ задан ее периметром. Для наибольшего приближения к реальному периметру ОТУ можно рассматривать некоторую ее произвольную форму. Однако переход к расчетам числа ВД для ОТУ такой формы проведем после вспомогательных оценок количества датчиков для установок прямоугольной формы, а также в форме произвольного многоугольника.

¹ ТУ-газ-86. Требования к установке сигнализаторов и газосигнализаторов. М., 1986. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9177/> (дата обращения: 10.02.2022).

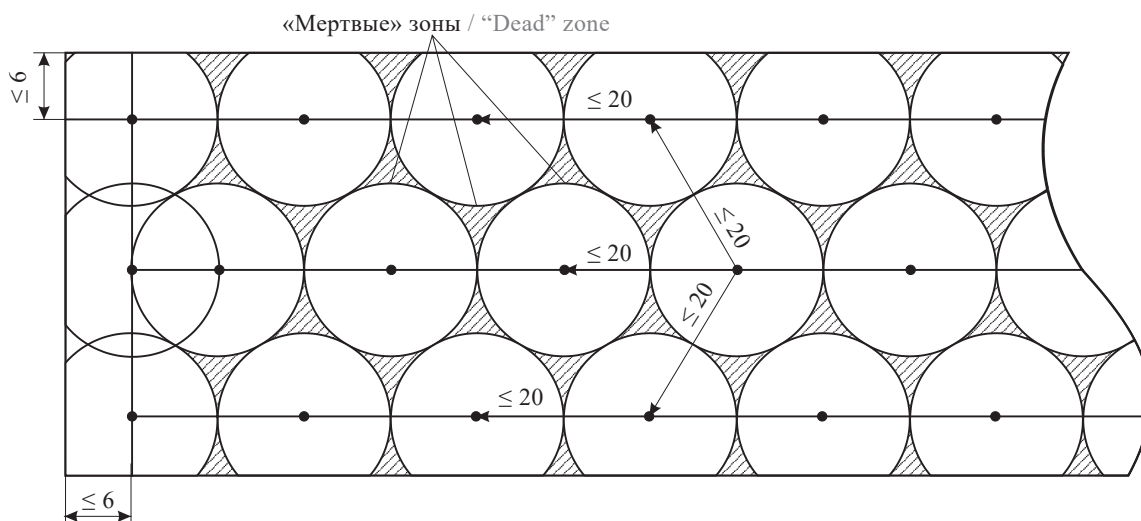


Рис. 1. Примерный порядок расположения датчиков сигнализаторов дозрывных концентраций на открытой установке шириной более 30 м

Fig. 1. An exemplary arrangement of sensors of pre-explosive concentration detectors at an outdoor unit whose width exceeds 30 m

Согласно требованию к установке¹ (п. 3.2), первый ряд должен быть удален от внешнего периметра установки на 6 метров. В этом случае для первой линии установки получаем подобный прямоугольник (рис. 2).

В данном случае получается подобный прямоугольник, периметр которого больше периметра открытой установки на $8l_{\text{рег}}^{(1)}$:

$$P_{\text{уст}}^{(1)} = P_{\text{ОУ}} + 8l_{\text{рег}}^{(1)}, \quad (1)$$

где $P_{\text{уст}}^{(1)}$ — периметр воображаемой первой линии установки ВД.

Для следующего ряда датчиков, которые устанавливаются в шахматном порядке, имеем также подобный прямоугольник. Чтобы установить его периметр, нужно решить простую геометрическую задачу — найти высоту равностороннего треугольника со стороной 20 м (рис. 3). Это следует из рис. 1. По теореме Пифагора это — $\sqrt{3} \times 10$ м, или 17,32 м. Обозначим эту величину как $l_{\text{рег}}^{(2)}$.

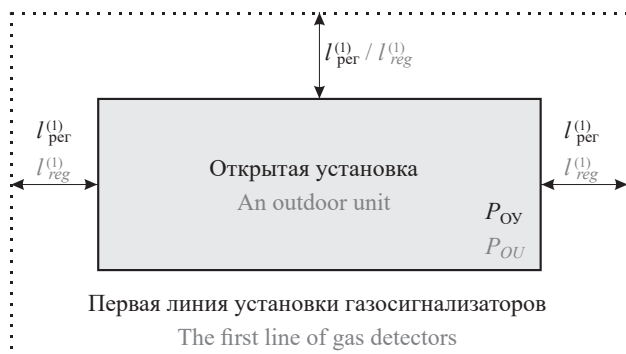


Рис. 2. Примерный порядок установки газосигнализаторов первой линии вокруг прямоугольной открытой установки: $P_{\text{ОУ}}$ — периметр открытой установки; $l_{\text{рег}}^{(1)}$ — регламентированное¹ (п. 3.2) расстояние до первой линии мест установки датчиков

Fig. 2. An exemplary layout of the first-line gas detectors surrounding a rectangular outdoor unit: P_{OU} — perimeter of an outdoor unit; $l_{\text{reg}}^{(1)}$ — regulated¹ (section 3.2) distance to the first line of gas detectors

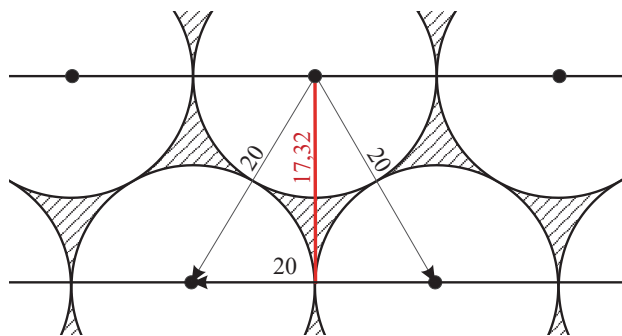


Рис. 3. Расстояние до второй (и третьей) линии газосигнализаторов вокруг прямоугольной открытой установки

Fig. 3. Distance to the second (and third) lines of gas detectors surrounding a rectangular outdoor unit

Тогда $P_{\text{уст}}^{(2)}$ — периметр воображаемой второй линии установки ВД

$$P_{\text{уст}}^{(2)} = P_{\text{ОУ}} + 8l_{\text{рег}}^{(1)} + 8l_{\text{рег}}^{(2)}. \quad (2)$$

Если размер установки не превышает 30 м (малый периметр), то необходимо два ряда ВД. Если нет — то три (большой периметр). В этом случае на расстоянии $l_{\text{рег}}^{(2)}$ от второй линии установки ВД будет еще одна, периметр которой $P_{\text{уст}}^{(3)}$ определится формулой

$$P_{\text{уст}}^{(3)} = P_{\text{ОУ}} + 8l_{\text{рег}}^{(1)} + 16l_{\text{рег}}^{(2)}. \quad (3)$$

Общая длина всех линий установки датчиков составит для малого периметра (< 30 м):

$$P_{\text{мал}}^{(\text{общ})} = P_{\text{уст}}^{(1)} + P_{\text{уст}}^{(2)} = 2P_{\text{ОУ}} + 16l_{\text{рег}}^{(1)} + 8l_{\text{рег}}^{(2)}, \quad (4)$$

для большого периметра (> 30 м):

$$P_{\text{бол}}^{(\text{общ})} = P_{\text{уст}}^{(1)} + P_{\text{уст}}^{(2)} + P_{\text{уст}}^{(3)} \quad (5)$$

или

$$P_{\text{бол}}^{(\text{общ})} = 3P_{\text{уст}}^{(1)} + 24l_{\text{рег}}^{(1)} + 24l_{\text{рег}}^{(2)}. \quad (6)$$

Соответственно, исходя из радиуса зоны действия ВД в 10 м, регламентное их количество в зависимости от периметра открытой установки определяется как

$$N_{\text{мал}}^{(\text{общ})} = 1/20(2P_{\text{ОУ}} + 16l_{\text{рег}}^{(1)} + 8l_{\text{рег}}^{(2)}) \quad (7)$$

для малого периметра и

$$N_{\text{бол}}^{(\text{общ})} = 1/30(3P_{\text{ОУ}} + 24l_{\text{рег}}^{(1)} + 24l_{\text{рег}}^{(2)}) \quad (8)$$

для большого периметра.

Здесь величины $N_{\text{мал}}^{(\text{общ})}$ и $N_{\text{бол}}^{(\text{общ})}$ — значения необходимых к установке ВД, получаемые при делении. В случае, если они не являются целыми, то регламентированное количество требуемых к установке датчиков $N_{\text{мал}}^{(\text{общ})}$ (и $N_{\text{бол}}^{(\text{общ})}$) следует округлить вверх до ближайшего целого числа.

$$N_{\text{мал}}^{(\text{общ})} = \begin{cases} N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-}, & [N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-}] = N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-}, \\ N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-} + 1, & [N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-}] \neq N_{\text{мал}}^{(\text{общ})-}; \end{cases} \quad (9)$$

$$N_{\text{бол}}^{(\text{общ})} = \begin{cases} N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-}, & [N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-}] = N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-}, \\ N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-} + 1, & [N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-}] \neq N_{\text{бол}}^{(\text{общ})-}. \end{cases} \quad (10)$$

В формулах (7) и (8) зафиксирована зависимость числа устанавливаемых ВД вокруг ОТУ НПЗ прямоугольной формы от ее периметра и регламентированных расстояний установки ВД. Для первой линии установки¹ установлено значение в 6 м, для последующих ($l_{\text{рег}}^{(2)}$ и $l_{\text{рег}}^{(3)}$) — 17,32 м. Эти формулы можно также применять и для других объектов защиты на предприятиях, которые используют требование к установке¹ в качестве основного нор-

мативного документа. В случаях, когда установлены иные значения для удаления линий установки ВД, данные формулы также позволяют рассчитать регламентированное их количество.

Выводы

Таким образом, в работе произвели расчет регламентного числа устанавливаемых датчиков стационарных газосигнализаторов ОТУ НПЗ прямоугольной формы с целью определения установленного норма-

тивным документом¹ количества ВД. Полученная оценка отражает особенности установки датчиков газосигнализаторов любых типов по классификации в соответствии с физическими методами анализа [23, 24]. Имея данные о периметре ОТУ, можно произвести расчет количества рядов для установки приборов, длины каждого из рядов, нормативно установленного количества ВД газосигнализаторов в каждом из рядов. Критерии газовой чувствительности газосигнализаторов и количество определяемых ими газов могут быть любыми.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M.* Accident prevention approach throughout process design life cycle // *Process Safety and Environmental Protection*. 2014. Vol. 92. Issue 5. Pp. 412–422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. *Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V.* Intellectual management decision support in gas industry // *Automation and Remote Control*. 2011. Vol. 72. Issue 5. Pp. 1095–1101. DOI: 10.1134/S0005117911050183
3. *De Cillis F., Inderst F., Pascucci F., Setola R., Tesei M., Bragatto B.A.* Improving the safety and the operational efficiency of emergency operators via on field situational awareness // *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol. 53. Pp. 331–336. DOI: 10.3303/CET1653056
4. *Salameh H.B., Dhainat M., Benkhelifa E.* A survey on wireless sensor network-based IoT designs for gas leakage detection and fire-fighting applications // *Jordanian Journal of Computers and Information Technology (JJCIT)*. 2019. Vol. 5. Issue 02. Pp. 60–72. DOI: 10.5455/jjcit.71-1550235278
5. *Gaur A., Singh A., Kumar A., Kulkarni K.S., Lala S., Kapoor K. et al.* Fire sensing technologies: A review // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. Issue 9. Pp. 3191–3202. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2894665
6. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Методика оценки готовности к работе оборудования АСПВБ первого уровня информирования на объектах ТЭК в особых условиях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 1. С. 35–46.
7. *Прохоров А.М.* Большая советская энциклопедия. 3-е изд. М. : Сов. Энциклопедия. 1969.
8. *Fonollosa J., Solórzano A., Marco S.* Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: A review // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Issue 2. P. 553. DOI: 10.3390/s18020553
9. *Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al.* Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research // *Faraday discussions*. 2016. Vol. 189. Pp. 85–103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
10. *Szulczyński B., Gębicki J.* Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air // *Environments*. 2017. Vol. 4. No. 1. P. 21. DOI: 10.3390/environments4010021
11. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 150 с.
12. *Федоров А.В.* Научные основы создания автоматизированной системы управления противопожарной защитой нефтеперерабатывающих производств. М. : Академия государственной противопожарной службы МВД России, 2000. 392 с.
13. *Фомин В.И., Федоров А.В., Лукьянченко А.А., Костюченков Д.К.* Автоматический аналитический контроль взрывоопасности воздушной среды промышленных объектов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2004. Т. 13. № 4. С. 49–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18027450>
14. *Васьков Р.Е., Богач В.В.* О некоторых вопросах планирования мероприятий по локализации и ликвидации аварий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 2. С. 428–429. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23006585>
15. *Френкель Б.А.* Промышленные анализаторы состава и свойств жидкостей и газов в процессах переработки нефти : Тематический обзор. М. : ЦНИИТЭнефтехим. 1995. 145 с.

16. Афанасьев Д.С., Бардакова Е.А., Быстрыков Д.С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 4. С. 1–12. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/1-12.pdf>
17. Мотин А.В., Вергазов И.Р., Чапанов Н.С., Федоренко В.В. Анализ и выбор методов преобразования концентрации компонентов ракетного топлива в воздухе рабочих мест и окружающей среды // Информационно-управляющие и измерительные системы : мат. XI отраслевой науч.-техн. конф. приборостроительных организаций ГК «РОСКОСМОС» : посвящ. 30-летию полета многоразовой транспортной космической системы «Энергия – Буран». М. : Спутник+, 2018. С. 92–96.
18. Кондратьева О.Е., Росляков П.В. Сравнительный анализ газоаналитических систем для проведения непрерывного мониторинга выбросов ТЭС // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 48–62. DOI: 10.1134/S0040363617060029
19. Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки готовности термохимических газосигнализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 61–74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74
20. Shrivastava N., Shukla V. Fire detection & alarm system in oil & gas refinery // International Journal of Scientific Research & Engineering Trends. 2019. Vol. 5. Issue 1. Pp. 26–31.
21. Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Расчет времени и состава бригады для мероприятий калибровки термохимических датчиков на открытых установках НПЗ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2020. № 12. С. 38–43. DOI: 10.33285/0132-2222-2020-12(569)-38-43
22. Rad A., Rashtchian D., Badri N. A risk-based methodology for optimum placement of flammable gas detectors within open process plants // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 105. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.psep.2016.10.012
23. Korotcenkov G. Handbook of gas sensor materials. Volume 1: Conventional Approaches. New York : Springer, 2013. 442 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
24. Хаматдинова А.В., Смородова О.В. Приборный контроль состояния газовоздушной среды на предприятиях нефтепереработки // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 325–331.

REFERENCES

1. Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M. Accident prevention approach throughout process design life cycle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014; 92(5):412–422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*. 2011; 72(5):1095–1101. DOI: 10.1134/S0005117911050183
3. De Cillis F., Inderst F., Pascucci F., Setola R., Tesei M., Bragatto B.A. Improving the safety and the operational efficiency of emergency operators via on field situational awareness. *Chemical Engineering Transactions*. 2016; 53:331–336. DOI: 10.3303/CET1653056
4. Salameh H.B., Dhainat M., Benkhelifa E. A survey on wireless sensor network-based IoT designs for gas leakage detection and fire-fighting applications. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology (JJCIT)*. 2019; 5(02):60–72. DOI: 10.5455/jjcit.71-1550235278
5. Gaur A., Singh A., Kumar A., Kulkarni K.S., Lala S., Kapoor K. et al. Fire sensing technologies: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2019; 19(9):3191–3202. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2894665
6. Topolskiy N.G., Samarina I.V., Strogonov A.Yu. Operating readiness evaluation method of first level information distribution AFES equipment at facilities of fuel and energy complex in special conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):35–46. (rus).
7. Prokhorov A.M. *Great Soviet Encyclopedia*. 3rd Ed. Moscow, Sovietskaia Entsiklopediia Publ., 1969. (rus).
8. Fonollosa J., Solórzano A., Marco S. *Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: A review*. *Sensors*. 2018; 18(2):553. DOI: 10.3390/s18020553
9. Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday discussions*. 2016; 189:85–103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
10. Szulczyński B., Gębicki J. Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air. *Environments*. 2017; 4(1):21. DOI: 10.3390/environments4010021

11. Khrapsky S.F., Starikov V.I., Rysev D.V. *Industrial and fire automation systems*. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2013; 150. (rus).
12. Fedorov A.V. *Scientific bases of creation of the automated control system of fire protection of oil refineries*. Moscow, State Fire Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000; 392. (rus).
13. Fomin V.I., Fedorov A.V., Lukyanchenko A.A., Kostyuchenkov D.K. An automatic analytical control of explosion hazard of air medium of industrial objects. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 13(4):49-54. (rus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18027450>
14. Vaskov R.E., Bogach V.V. About some questions of planning of actions for localization and elimination of accidents. *Bulletin of Kazan technological University*. 2015; 18(2):428-429. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23006585> (rus).
15. Frankel B.A. *Industrial analyzers of the composition and properties of liquids and gases in oil refining processes*. Moscow, TSNIITeneftekhimi, 1995; 145. (rus).
16. Afanasiev D.S., Bardakova E.A., Bystryakov D.S. Analytical review sensors of volatiles for the internet of things. *Telecom IT*. 2016; 4(4):1-12. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/1-12.pdf> (rus).
17. Motin A.V., Vergazov I.R., Chaponov N.S., Fedorenko V.V. Analysis and selection of methods for converting the concentration of rocket fuel components in the air of workplaces and the environment. *Information and control and measurement systems : materials of the XI branch scientific and technical conference of instrument-making organizations of the State Corporation "ROSCOSMOS" : dedicated to the 30th anniversary of the flight of the reusable space transport system "Energia – Buran"*. Moscow, Sputnik+ Publ., 2018; 92-96. (rus).
18. Kondratyeva O.E., Roslyakov P.V. Comparative study of gas-analyzing systems designed for continuous monitoring of TPP emissions. *Thermal Engineering*. 2017; 6:48-62. DOI: 10.1134/S0040363617060029 (rus).
19. Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Strogonov A.Yu. Thermochemical gas analyzer readiness assessment model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):61-74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74 (rus).
20. Shrivastava N., Shukla V. Fire detection & alarm system in oil & gas refinery. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*. 2019; 5(1):26-31.
21. Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Strogonov A.Yu. Calculation of time and team composition for thermochemical detectors calibration installed around open refinery plants. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*. 2020; 12:38-43. DOI: 10.33285/0132-2222-2020-12(569)-38-43 (rus).
22. Rad A., Rashtchian D., Badri N. A risk-based methodology for optimum placement of flammable gas detectors within open process plants. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 105:175-183. DOI: 10.1016/j.psep.2016.10.012
23. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials. Volume 1: Conventional Approaches*. New York, Springer, 2013; 442. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
24. Khamatdinova A.V., Smorodova O.V. The instrumental control of gas environment state on refining plants. *Technology of technosphere safety*. 2015; 4(62):325-331. (rus).

Поступила 13.01.2022, после доработки 17.02.2022;
принята к публикации 02.03.2022

Received January 13, 2022; Received in revised form February 17, 2022;
Accepted March 2, 2022

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

КРЮЧКОВ Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности критически важных объектов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: hook66@list.ru

СТРОГОНОВ Андрей Юрьевич, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

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

Alexey V. KRYUCHKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Security of Critical Facilities, National University of Oil and Gas (Gubkin University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: hook66@list.ru

Andrey Yu. STROGONOV, Graduate Student of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas (Gubkin University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(2):41-51

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW ARTICLE

УДК 614.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51>

Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе

Денис Михайлович Гордиенко, Юрий Николаевич Шебеко✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья содержит аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам пожарной безопасности водородных автозаправочных станций (АЗС) и стоянок автомобилей на водородном топливе.

Общая характеристика пожарной опасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе. Дана общая характеристика специфики пожарной опасности объектов, использующих газообразный и сжиженный водород.

Водородные заправочные станции. Рассмотрены автозаправочные станции с использованием как газообразного, так и жидкого водорода. Показано, что для водородных АЗС наибольшую опасность представляет компрессорное оборудование, для которого значение потенциального риска на территории станции вблизи него превышает 10^{-4} год⁻¹. Отмечено, что минимальное расстояние от указанного оборудования до окружающих объектов, не относящихся к станции, должно составлять 50 м.

Стоянки автомобилей на водородном топливе. Проанализирована специфика пожарной опасности стоянок для водородных автомобилей. Установлено, что при возникновении факельного горения при истечении водорода из сбросных клапанов топливных баков давление в гараже небольшого объема (индивидуальные гаражи) может достигать значения 55 кПа. Для струи водорода без образования факела указанное давление может достигать значения 10 кПа. Столь значительные давления при образовании факела вызваны высокой нормальной скоростью горения водорода, обуславливающей скорость тепловыделения во фронте пламени, существенно превышающую соответствующую величину для факелов углеводородных газов. Вследствие этого распространение требований, предъявляемых к помещениям для хранения автомобилей на углеводородном топливе, к гаражам для водородных автомобилей (как это регламентировано нормативным документом NFPA 2), может быть ошибочным.

Выводы. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при разработке нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе.

Ключевые слова: автозаправочные станции; помещения для хранения автомобилей; газообразный водород; жидкий водород; специфика пожарной опасности; опасные факторы пожара

Для цитирования: Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51

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

The fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles

Denis M. Gordienko, Yury N. Shebeko✉

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

ABSTRACT

Introduction. The article offers an analytical review of domestic and foreign publications on the fire safety of hydrogen refueling stations and garages for hydrogen-powered vehicles.

General characteristics of the fire hazard of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles. The authors offer the general characteristic of a specific fire hazard from facilities using compressed and liquid hydrogen.

Hydrogen refueling stations. Refueling stations using compressed and liquid hydrogen were considered in the article. It was found that compressors are the most hazardous items installed at refueling stations; therefore, the value of potential risks, arising in the area of a refueling station, exceeds 10^{-4} year $^{-1}$. Experiments, simulating accidents at hydrogen refueling stations, are described. According to the authors, the minimal distance between the compressor and facilities located outside the station area should exceed 50 m.

Garages for hydrogen-powered vehicles. Features of the fire safety of garages for hydrogen-powered vehicles were analyzed. The authors have found that the overpressure inside a small garage (an individual garage) can reach 55 kPa in case of a jet flame caused by the release of hydrogen through the safety valves of fuel tanks. The overpressure of a hydrogen jet can reach 10 kPa in case of the unignited release of hydrogen. High pressure values that accompany the jet formation are triggered by the high normal burning velocity of hydrogen that boosts the velocity of heat release in the flame front, exceeding the same value for flares of hydrocarbon gases. Therefore, requirements, applicable to storage premises designated for vehicles powered by hydrocarbon fuel, may be erroneously extended to garages for hydrogen-powered vehicles (pursuant to NFPA 2).

Conclusions. The results of this analysis can be contributed to regulatory documents to be developed in the area of fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles.

Keywords: refueling stations; garages; gaseous hydrogen; liquid hydrogen; fire safety features; hazardous fire factors

For citation: Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. The fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):41-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51 (rus).

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

Введение

В настоящее время в мире наблюдается повышенное внимание к развитию водородной энергетики. Многие страны мира приняли специализированные государственные стратегии и дорожные карты в указанной области. В Российской Федерации распоряжением Правительства от 5 августа 2021 г. № 2162-р утверждена концепция развития водородной энергетики. Одной из важнейших задач, предусмотренных данной концепцией, является создание нормативной правовой базы в области безопасности объектов водородной энергетики, в частности для объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе. Основными объектами указанной инфраструктуры являются заправочные станции и объекты хранения автомобилей на водородном топливе. В то же время имеющиеся в Российской Федерации нормативные правовые и нормативные документы в области пожарной безопасности не содержат всех необходимых требований для упомянутых выше объектов, что показал анализ, проведенный в работе [1]. В связи с этим представляется необходимым изучение передового международного опыта в указанной области. В работах [2, 3] проанализированы публикации в области оценки безопасности автомобилей и автозаправочных станций с использованием водородного топлива. Настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов пожарной безопасности таких объектов инфраструктуры водородного транспорта, как автозаправочные станции (в развитие работы [2]), и объектов хранения водородных автомобилей. При этом в силу того, что в российской научной литературе этим вопросам уделяется недостаточно внимания,

проводится анализ работ, опубликованных в ведущих международных научных журналах.

Общая характеристика пожарной опасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе

В работе [4] дан обзор публикаций, посвященных безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики. Отмечены основные различия в специфике пожарной опасности водорода H_2 и природного газа (далее по тексту — CH_4 — основной компонент природного газа), обусловленные значительно более высокой пожаровзрывоопасностью водорода:

- взрывы смесей H_2 -воздух несравненно опаснее по сравнению с взрывами смесей CH_4 -воздух;
- взрывозащищенность электрооборудования для водорода обеспечить гораздо сложнее по сравнению с природным газом;
- смеси H_2 -воздух зафлегматизировать значительно сложнее, чем смеси CH_4 -воздух;
- для смесей H_2 -воздух достаточно вероятен при определенных условиях переход горения в детонацию, чего нельзя сказать про смеси CH_4 -воздух.

При проливах сжиженного водорода (LH_2) образующиеся холодные смеси тяжелее окружающего воздуха, т.е. паровое облако ведет себя как облако тяжелого газа, образуя взрывоопасные смеси у поверхности земли.

Проанализирован подход стандарта NFPA 2: 2020 «Hydrogen Technologies Code» к определению безопасных расстояний. Согласно этому стандарту, безопасные расстояния определяются по концентра-

ции, равной нижнему концентрационному пределу распространения пламени (НКПР), на основе максимальной проектной аварии для утечки из отверстия с площадью, составляющей 1 % от площади поперечного сечения трубопровода высокого давления. Возможен другой подход к определению безопасных расстояний — с помощью контуров потенциального риска 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} год⁻¹ (в зависимости от видов соседних объектов, до которых определяются расстояния).

Водородные АЗС обычно имеют резервуары хранения сжатого GH_2 (давление 20–35 МПа) или жидкого LN_2 водорода, компрессоры, топливораздаточные колонки на давление 35 или 70 МПа, заправочные рукава, сбросные трубы. Возможен вариант получения H_2 непосредственно на станции методом электролиза или химическим путем. Кратко рассмотрена авария на водородной АЗС в Норвегии, имевшая место 10.06.2019 г. Авария началась с утечки из фланцевого соединения из резервуара объемом 50 л с давлением 95 МПа, содержавшего 2,5 кг H_2 . Расход газа при утечке, которая не была замечена в течение двух часов, составлял, согласно проведенным оценкам, 0,04 г/с. Затем масштаб утечки значительно увеличился, и за 2–3 с было выброшено 2 кг H_2 . Произошел сильный взрыв, за которым последовало 2–3 более слабых. Была разрушена стена, окружавшая АЗС, выбиты стекла в домах на расстоянии 65 м, сработали подушки безопасности в автомобилях на расстоянии 50 м.

Водород в качестве моторного топлива находит применение не только для автомобильного транспорта. В Норвегии планируют перевести на водородное топливо пассажирские паромы, широко используемые в этой стране. Рассматривается также возможность создания тепловозов, использующих в качестве топлива жидкий водород (в Германии с 2018 г. ходят поезда с тепловозами на водородном топливе). Работы в этом направлении проводятся в России, Нидерландах и Великобритании.

Вопросы применения LN_2 в качестве моторного топлива рассмотрены в работах [5, 6]. В работе [5] кратко описаны эксперименты по изучению проливов жидкого водорода. В 1980 г. под эгидой NASA проведены эксперименты по проливу $5,7 \text{ м}^3$ (около 400 кг) LN_2 из резервуара под давлением 0,69 МПа. Истечение продукта происходило в течение 24–40 с с расходом 0,8–15 кг/с. Концентрация GH_2 в облаке превышала 8 % (об.). Облако паров распространялось вблизи поверхности земли на расстояние 50–100 м, после чего приобретало положительную плавучесть и рассеивалось в атмосфере. Чем выше была относительная влажность воздуха, тем раньше облако приобретало положительную

плавучесть. Описаны эксперименты, выполненные в Великобритании лабораторией здоровья и безопасности (Health and Safety Laboratory) в 2010–2011 гг. с истечением жидкого водорода с расходом около 70 г/с. При скорости ветра 2,7 м/с на расстоянии 7,5 м у поверхности земли регистрировали концентрацию водорода 13–14 % (об.). С помощью программы FLACS проведено сравнение размеров опасных зон при истечении жидкого водорода и жидкого метана. Найдено, что горизонтальные размеры опасных зон по уровню НКПР при истечении LN_2 в разы превышают аналогичные размеры для жидкого метана. Сделан вывод, что паровое облако, образующееся при испарении жидкого водорода, ведет себя как облако тяжелого газа.

В работе [6] описаны эксперименты по изучению струевых истечений жидкого водорода в камере с размерами $8 \times 5,5 \times 3,4 \text{ м}$ с расходом 10 г/с через сопло диаметром 0,5 и 1,0 мм под давлением 0,7–3,0 МПа (температура жидкой фазы 34–44 К). Исследованы случаи с зажиганием и без зажигания струи. Получены зависимости размеров зон по уровню НКПР и интенсивности теплового излучения факела от расхода LN_2 .

В работах [7, 8] изучена специфика пожарной опасности проливов жидкого водорода. Найдено, что при квазимгновенном проливе небольших количеств (несколько десятков литров) LN_2 на неограниченную поверхность за счет быстрого испарения образуются паровые облака с формой, близкой к сферической. Пролив больших количеств жидкого водорода приводит к образованию паровых облаков полусферической формы, обладающих вначале отрицательной плавучестью вследствие низкой температуры газа, с последующей трансформацией в грибовидные облака. Получены данные по массовой скорости испарения LN_2 при проливах на различные поверхности. Предложены формулы для оценки объема взрывоопасной смеси, скорости подъема парового облака, концентрации водорода на его видимой границе. Изучены экспериментально параметры дефлаграции и детонации водородовоздушных смесей. Получены полуэмпирические формулы для прогнозирования параметров этих процессов.

В работе [9] выполнен обзор публикаций в области водородной безопасности объектов различного назначения, включая исследования имевших место аварий, распространения аварийных утечек водорода и взрывов водородовоздушных смесей. Проанализировано 120 аварий с участием водорода с 1999 по 2019 годы. Найдено, что 38,3 % аварий произошло в лабораториях, 10,6 % на водородных АЗС и 9,0 % на других объектах. Для лабораторий основная причина аварий — ошибка человека и отказ оборудования. Для прочих объектов основны-

ми причинами являются разрушение трубопроводов, запорной арматуры и нарушение герметичности фланцевых соединений (35,78 %). На ошибки при эксплуатации и проектировании приходится 14,22 и 12,07 % всех аварий соответственно. По представленным данным 41,83 % аварий привели только к материальным потерям, 10,27 % связаны с поражением людей, 5,32 % — к человеческим жертвам. Для сравнения указано, что аварии на объектах с наличием сжиженного природного газа, связанные с гибелью людей, составляют только 2,65 % всех аварий.

Обзор исследований в области хранения, транспортировки и применения водорода представлен в работе [10]. Указаны следующие основные методы производства водорода, используемые в промышленности:

- электролиз воды — 3,9 %;
- газификация угля — 16 %;
- реформинг нефти — 30 %;
- реформинг природного газа — 50 %;
- прочие способы — 0,1 %.

Проанализированы способы хранения водорода. Для хранения сжатого газа основным недостатком является низкая массовая плотность хранящегося продукта. Для хранения сжиженного водорода основным недостатком является низкая температура хранения (ниже 20 К), при этом за счет испарения из-за теплопритока от окружающей среды ежедневные потери составляют 0,2 % для крупномасштабных хранилищ и 2–3 % для небольших хранилищ. Одним из возможных методов хранения и транспортировки водорода является использование гидридов металлов, однако этот способ может быть эффективным только для небольших хранилищ.

Водородные заправочные станции

Ряд вопросов пожарной безопасности водородных автозаправочных станций был проанализирован в работе [2]. В данном разделе рассмотрены более поздние опубликованные работы в этой области.

В работе [11] выполнен сравнительный анализ нормативных требований к водородным автозаправочным станциям таких стран, как США (штат Калифорния), Великобритания, Италия, Германия, Канада, Швеция, Норвегия, Дания и Испания. Дана характеристика европейской директивы для объектов инфраструктуры с использованием альтернативных видов топлива, в том числе и водорода (Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure). Рассмотрены требуемые барьеры безопасности для различных частей АЗС. Дается обзор различных подходов к определению безопасных расстояний для размещения заправочных станций.

В работе [12] проведен анализ риска для водородной АЗС с хранением топлива в компримированном виде. Рассмотрены три основных сценария аварии: утечка водорода при разгерметизации заправочного рукава; утечка водорода из фланцевых соединений хранилища компримированного газа; утечка водорода из компрессора. Деревья событий рассматривались с учетом барьеров безопасности. Оценка поражения ударной волной взрыва и тепловым излучением пожара проводилась с помощью пробит-функций. Найдено, что величина потенциального риска от аварий с утечкой водорода (кроме утечек из компрессора) в радиусе более 6 м от ТРК не превышает 10^{-6} год $^{-1}$. Для аварий с утечкой из компрессора потенциальный риск на расстоянии 10 м превышает 10^{-4} год $^{-1}$. При использовании стены высотой 3 м, отделяющей компрессор от окружающих объектов, потенциальный риск для персонала и посетителей станции снижается до приемлемого уровня.

В работе [13] проведено экспериментальное исследование влияния загроможденности территории АЗС технологическим оборудованием и наличия защитных стен на опасность взрыва водородовоздушных смесей, образующихся при аварийных утечках водорода. Моделировалось хранилище компримированного водорода в виде двух рядов резервуаров (по 5 в каждом ряду, один ряд над другим). Длина каждого резервуара 2,64 м, диаметр 0,8 м. Хранилище ограничивалось одной или двумя стенами длиной 5,4 и высотой 4,8 м, размещенными на расстоянии 1 м от резервуаров. Модель хранилища ограничивалась прозрачной пластиковой пленкой толщиной 23 мкм, размеры ограждения $5,4 \times 6 \times 2,5$ м (объем 67,59 м 3). В объеме ограждения создавали исследуемые водородовоздушные смеси. Выполнено два вида экспериментов:

1. С зажиганием предварительно перемешанной смеси H_2 -воздух для изучения влияния положения источника зажигания, состава смеси и степени загроможденности пространства;

2. С зажиганием струи водорода, истекающего под давлением 40 МПа вблизи резервуаров хранения из отверстий диаметром 8 и 5,5 мм для изучения влияния положения струи, диаметра отверстия истечения и времени задержки зажигания.

В экспериментах по п. 1 найдено, что скорость пламени достигала значения 120 м/с. В зависимости от места зажигания максимальное значение давления взрыва $\Delta P_{\max}$ достигало 62,8 кПа при наличии одной стены и 111,1 кПа при наличии двух стен. На расстоянии 24 м от модели хранилища величина $\Delta P_{\max}$ снижалась до 20 кПа.

В экспериментах по п. 2 происходило истечение H_2 в загроможденное пространство и рядом

с ним с задержкой зажигания от 0,1 до 5 с. Найдено, что при снижении давления в резервуаре, из которого происходило истечение, с 40 до 10 МПа величина $\Delta P_{\max}$ быстро падает из-за уменьшения степени турбулентности водородовоздушной смеси. Вблизи загроможденного пространства давление взрыва составило до 1451 кПа, на расстоянии 19,5 м величина $\Delta P_{\max}$ падала до значения не более 13,2 кПа.

Сделан вывод, что в ближней зоне опаснее авария со струевым истечением, а в дальней — авария со сгоранием предварительно перемешанной смеси.

Кратко проанализированы выполненные в работе [14] аналогичные эксперименты, в которых изучали горение водородовоздушных смесей в помещении размерами $6 \times 5 \times 4$ м в присутствии загромождения в виде 35 баллонов емкостью 250 л каждый. Стены помещения имели высоту 3 м с дальнейшим промежутком до крыши шириной 1 м, заполненным металлической сеткой с проницаемостью 50 %. Гомогенную смесь H_2 (26 % (об.)) — воздух объемом 120 м^3 зажигали в геометрическом центре помещения. Максимальное давление взрыва в помещении составляло до 100 кПа. Также исследовали зажигание струи водорода из модели ТРК с отверстием диаметром 8 мм. Максимальное значение давления $\Delta P_{\max}$ наблюдали при времени задержки зажигания t , равном 1,2 с. Найдено, что $\lg(P_{\max})$ линейно уменьшается с ростом $\lg(t)$ задержки зажигания более 1,2 с.

В работе [15] рассмотрена гибридная водородная АЗС, в которой водород получают непосредственно на станции за счет электролиза воды с использованием электроэнергии от возобновляемых источников (солнечная и/или ветровая энергия). АЗС предназначена для заправки топливных резервуаров автомобилей при давлениях 35 и 70 МПа. Станция включает в себя ветровой и/или солнечный электрогенератор, электролизную систему производства водорода, автомобиль для транспортировки компримированного GH_2 , системы компримирования и хранения газа, ТРК. Наиболее опасным компонентом станции является система компримирования газа до давлений 20, 43,8 и 87,5 МПа с дальнейшей закачкой в резервуары хранения. Найдено, что частоты опасных событий с выходом водорода в атмосферу не превышают 10^{-5} год^{-1} . Согласно европейской директиве¹, если риск смертельного поражения людей менее $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, то нормирование расстояний внутри водородной станции не требуется. Это условие не выполняется только для компрессоров, вокруг которых предлагается создание защитных стен. Минимальное расстояние, при ко-

тором не наблюдается смертельного поражения от факела, составляет 20–23 м. Для предотвращения теплового воздействия факела на технологическое оборудование предлагается использовать его водяное орошение с интенсивностью $0,17 \text{ л}/(\text{м}^2 \text{ с})$. Минимальное расстояние от компрессоров до других объектов станции должно составлять 6 м, а до объектов, не относящихся к АЗС, — 50 м.

Одной из основных опасностей водородных заправочных станций является образование факелов с их воздействием на соседние объекты как внутри, так и вне станции. Метод оценки геометрических характеристик водородных факелов в зависимости от давления и диаметра истечения представлен в работах [16, 17]. В работе [16] теоретически и экспериментально изучены пределы устойчивого горения, размеры и конфигурации турбулентных факелов различных газов, в том числе и водорода. Показано, что в зависимости от скорости и диаметра отверстия истечения могут иметь место как присопловые (стабилизированные на срезе горелки), так и оторванные (стабилизированные на некотором расстоянии от среза горелки) от факела. Получены полуэмпирические соотношения, описывающие условия стабилизации и геометрические параметры факелов.

В работе [17] описан метод определения безопасных расстояний для реагирующей (факел) и нереагирующей (струйный выброс) струй водорода. Для струйного выброса получена формула, позволяющая рассчитать концентрацию водорода по оси выброса в зависимости от диаметра сопла и расстояния от места выброса. Формула верифицирована на основе результатов 53 экспериментов, опубликованных в литературе, для выбросов водорода при давлениях до 40 МПа, диаметрах сопла d_{noz} от 0,25 до 25 мм и расстояниях x от места выброса в диапазоне x/d_{noz} от 4 до 28 580. На основе обработки результатов 123 экспериментов получены полуэмпирическая формула для определения длины водородного факела в зависимости от массового расхода газа и диаметра сопла. Показано, что регламентированный стандартом NFPA 55:2010 «Compressed gases and cryogenic fluids code» метод оценки длины факела в случае водорода существенно завышает эту длину по сравнению с экспериментом. Метод расчета безопасных расстояний при струевом истечении газообразного водорода (с горением и без горения) представлен также в работе [18] для диаметров истечения от 0,25 до 6,35 мм и давлении истечения до 103,5 МПа. Получены формулы, позволяющие оценить расстояния, на которых реализуется та или иная плотность теплового потока, с относительной погрешностью до 18 %. Найдено, что на расстоянии до 11 м от факела плотность тепло-

¹ IGC Doc 75/07/E. Determination of safety distances. European Industrial Gases Association AISBL. 2007.

вого потока может составлять до 25 кВт/м². Концентрация H₂ более 8 % (об.) по оси струи водорода может наблюдаться на расстояниях до 26 м.

Стоянки автомобилей на водородном топливе

Повышенная пожаровзрывоопасность водорода по сравнению с углеводородными топливами накладывает отпечаток не только на требования пожарной безопасности к водородным АЗС, но и к стоянкам автомобилей на водородном топливе. Стандарт NFPA 2: 2020 «Hydrogen Technologies Code» (глава 17) регламентирует для стоянок автомобилей на водородном топливе те же требования, что и для соответствующих объектов с автомобилями на газовом углеводородном топливе. Однако краткий анализ ряда оригинальных научных публикаций по данному вопросу, который представлен ниже, говорит о возможной неприемлемости такого подхода.

В работе [19] рассмотрены вопросы безопасности индивидуальных гаражей для автомобилей на водородном топливе. Выполнены эксперименты по моделированию утечек водорода различного масштаба. Модель гаража имела размеры 6,1 × 6,1 × 3,05 м с наличием трех вентиляционных отверстий размерами 0,2 × 0,2 и 0,3 × 0,3 м. Массовая скорость истечения водорода составляла 99,4 л/мин. Измеряли концентрацию H₂ в различных точках помещения. В экспериментах с зажиганием водорода геометрические характеристики пламени определяли с помощью термопар и видеокамеры. Было выполнено 16 опытов без присутствия автомобилей в модели гаража и 6 опытов с наличием автомобилей, у которых окошки и дверцы были закрыты, а водород подавался под днища автомобилей. В случае отсутствия автомобилей водородовоздушные смеси зажигали у потолка при достижении концентрацией H₂ величин 8, 12, 16 и 29 % (об.).

В случае отсутствия автомобилей заметный градиент концентраций водорода наблюдали в нижней части помещения, в верхней же его части указанный градиент был мал. Данный результат качественно совпадает с полученным ранее в работе [20]. При наличии автомобилей градиент концентраций водорода по высоте модели гаража был мал, однако концентрация H₂ в моторном отсеке быстро увеличивалась до 20 % (об.). Видимая скорость пламени при зажигании водородовоздушных смесей составляла от 0,6 до 35 м/с в зависимости от содержания в них водорода. При средней концентрации водорода 15,2 % (об.) одна из стен, выполненная из гипсокартона, была отнесена взрывом на несколько метров. При концентрации водорода 29,3 % (об.) упомянутая стена, а также крыша были снесены, а в кирпичных стенах образовались трещины. Сделан вывод, что

залповый выброс H₂ из топливной системы автомобиля хотя и маловероятен, но представляет высокую опасность с точки зрения последствий, в связи с чем следует обратить внимание на предотвращение и своевременное обнаружение таких выбросов.

В работе [21] проведено численное моделирование аварии с истечением струи водорода из топливного бака автомобиля в объем гаража как с зажиганием, так и без зажигания струи с оценкой развиваемого при этом давления. Водород истекал под давлением 70 МПа из отверстия диаметром 3,34 мм, что соответствует срабатыванию теплового сбросного клапана. Гараж имел размеры 4,5 × 2,6 × 2,6 м с наличием отверстия в ограждающих конструкциях размерами 0,35 × 0,55 м, моделирующего окно. При истечении водорода без зажигания максимальное избыточное давление $\Delta P_{\max}$ составило 0,55 кПа, что является безопасным для строительных конструкций. При зажигании струи через 1 с после начала истечения избыточное давление в помещении достигало 55 кПа, и при этом давлении возможны серьезные разрушения строительных конструкций. Столь значительное давление при наличии реагирующей струи, существенно превышающее давление в случае зажигания струи газового углеводородного топлива, обусловлено значительно более высокой нормальной скоростью горения водорода по сравнению с углеводородами. Это показано также в работе [22], где были выполнены эксперименты по горению струй водорода и углеводородов, истекающих в объем помещения. Если гараж имеет достаточно высокую степень герметичности, то при истечении водорода из топливного бака при давлении до 70 МПа даже без зажигания давление в помещении может составлять 10–20 кПа [23].

Для правильной оценки пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе представляет интерес проанализировать опасность указанных автомобилей. С этой целью в работе [24] проведена сравнительная оценка пожарной опасности автомобилей на сжатом водороде и компримированном природном газе (КПГ). Для анализа выбран сценарий с образованием струевого пламени при разгерметизации топливного бака. Проведено моделирование с использованием метода CFD факела газа, истекающего при срабатывании теплового сбросного клапана, из отверстия диаметром 4,2 мм в резервуаре с водородом (содержит 4 кг газа при давлении 35 МПа) и в резервуаре с КПГ (содержит 20 кг газа при давлении 25 МПа). Найдено, что при указанных выше параметрах, типичных для автомобильных топливных резервуаров, длительность истечения КПГ в 2 раза больше, чем для водорода. Наибольший горизонталь-

ный размер зоны воздействия факела наблюдается через несколько секунд после начала истечения. Безопасные расстояния для пожарных в защитной одежде составляют 6 и 14 м для автомобилей на H_2 и КПП, а для прочих людей 12 и 29 м (с учетом коэффициента безопасности) соответственно. Из приведенных результатов следует, что тепловое излучение водородного факела более безопасно, чем для факела природного газа. Это обусловлено более низкой излучательной способностью пламени водорода в силу отсутствия в нем сажистых частиц.

В работе [25] выполнена расчетная оценка последствий аварийного выброса водорода в помещении большого объема (более 15 000 м³), моделирующем крупную стоянку автомобилей. Проведено параметрическое исследование влияния скорости истечения H_2 и размеров помещения на распределение концентраций водорода в нем. Полученные данные по распределению концентраций использованы для прогнозирования взрывных нагрузок при дефлаграции водородовоздушных смесей.

В работе [26] проведено экспериментальное исследование аварийных выбросов водорода в помещение, моделирующее гараж, при отсутствии источника зажигания. Изучали рост давления в помещении при возникновении указанных выбросов, которые могут происходить на практике при срабатывании предохранительных клапанов топливных баков. Эксперименты проведены в камере с размерами 2980 × 2000 × 2500 мм (объем 14,9 м³), имеющей вентиляционное отверстие. Измеряли концентрации водорода с помощью двух датчиков (один в средней по высоте части, второй у потолка). Площадь вентиляционного отверстия варьировали в диапазоне от 0,0012 до 0,0020 м². Массовая скорость истечения водорода составляла от 1,9 до 10,10 г/с при времени истечения от 90 до 200 с. Указанные параметры истечения отвечают срабатыванию предохранительных клапанов топливных баков с диаметрами 4,2 и 5,08 мм. Измеренные давления находились в диапазоне от 0,42 до 8,05 кПа, что, как правило, безопасно для основных строительных конструкций.

Возникает вопрос, чем обусловлены значительные величины давления, развиваемого в помещении гаража, при наличии реагирующей (зажигание струи с образованием факела) и не реагирующей (отсутствие зажигания) струи при аварийном истечении водорода из топливных баков транспортных средств. В случае образования факела повышение давления в помещении вызвано главным образом тепловыделением при сгорании водорода. Согласно [27, 28], скорость тепловыделения W во фронте газовой смеси пла-

мени пропорциональна S^2 , где S — нормальная скорость горения газа. Поскольку нормальная скорость горения водорода существенно превышает соответствующую величину для углеводородных газов [29], скорость тепловыделения в водородном факеле и развиваемое давление при его образовании в помещении значительно выше, чем в случае факелов углеводородных газов. Заметные давления при реагирующей струе обусловлены высокими значениями давления в водородных топливных баках (до 70 МПа) и диаметрах сбросного отверстия сбросных клапанов (до 5 мм).

Выводы

В настоящей работе проведен обзор публикаций, посвященных вопросам пожарной безопасности некоторых объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе (автозаправочные станции и стоянки автомобилей). Дана общая характеристика специфики пожарной опасности таких объектов. Рассмотрены автозаправочные станции с использованием как газообразного, так и жидкого водорода. Показано, что для водородных АЗС наибольшую опасность представляет компрессорное оборудование, для которого значение потенциального риска на территории станции и вблизи превышает 10^{-4} год⁻¹. Отмечено, что минимальное расстояние от указанного оборудования до окружающих объектов, не относящихся к станции, должно составлять 50 м.

Проанализирована специфика пожарной опасности стоянок для водородных автомобилей. Найдено, что при возникновении факельного горения при истечении водорода из сбросных клапанов топливных баков давление в гараже небольшого объема (индивидуальные гаражи) может достигать значения 55 кПа. Для струи водорода без образования факела указанное давление может достигать значения 10 кПа. Столь значительные давления при образовании факела вызваны высокой нормальной скоростью горения водорода, обуславливающей скорость тепловыделения во фронте пламени, существенно превышающую соответствующую величину для факелов углеводородных газов. Вследствие этого распространение требований, предъявляемых к помещениям для хранения автомобилей на углеводородном топливе, к гаражам для водородных автомобилей (как это регламентировано нормативным документом NFPA 2) может быть ошибочным. Зарегистрированное в ряде работ достаточно большое значение давления в помещении при истечении в него реагирующей струи H_2 (отсутствие зажигания) обусловлено высокой объемной скоростью истечения водорода в силу значительных величин давления хранения газа и диаметра отверстия сбросного клапана.

Полученные результаты анализа могут быть использованы при разработке отечественных нормативных документов для водородных АЗС и стоянок автомобилей на водородном топливе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шебеко Ю.Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 36–42. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.101.4.003
2. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 4. С. 42–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50
3. Поваляев А.Е., Колбасов А.Ф., Козлов В.Н. Безопасность водородного транспорта // Транспорт на альтернативном топливе. Спецвыпуск. 2021. С. 25–30.
4. Hansen O.R. Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions // Process Safety and Environment Protection. 2020. Vol. 143. Pp. 164–176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
5. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Pp. 1343–1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
6. Fridrich A., Breitung W., Stern G., Vesper A., Kuznetsov M. Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. Pp. 17589–17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070
7. Макеев В.И. Безопасность объектов с использованием криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 3. С. 34–45.
8. Болодьян И.А., Кестенбойм Х.С., Махвиладзе Г.М., Макеев В.И., Федотов А.П., Чугуев А.П. Взрывопожароопасность низкотемпературных облаков водорода в атмосфере // Горение гетерогенных и газовых систем : мат. 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черно-голова : Институт химической физики АН СССР, 1989. С. 15–17.
9. Yang F., Wang T., Deng X., Dang J., Huang Z., Hu S. et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. Pp. 31467–31488. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005
10. Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 72. Pp. 104569. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104569
11. Pique S., Wienberger B., De-Dianous V., Debray B. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. Issue 11. Pp. 7429–7439. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.158
12. Tsunemi K., Kihara T., Kato E., Kawamoto A., Saburi T. Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. Pp. 23522–23531. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.027
13. Shirvill E.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Sathiah P. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility — Part 1: Experimental study // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. Pp. 7618–7642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.135
14. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., Cronin P.M., Jonson D.M., Cleaver R.P. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. Pp. 2162–2170. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019
15. Pan X., Li Z., Zhang C., Lv H., Liu S., Ma J. Safety study of wind-solar hybrid renewable hydrogen refueling station in China // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Pp. 13315–13321.
16. Карпов В.Л. Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 1. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в неподвижной атмосфере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 3. С. 36–43.
17. Saffers J.-B., Molkov V.V. Towards hydrogen safety engineering for reacting and non-reacting hydrogen releases // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Pp. 344–350. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.05.002

18. *La Chance J., Houf W., Middleton B., Fluer L.* Analysis support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards. SAND2009-0874. Albuquerque : Sandia National Laboratory, 2009. 121 p.
19. *Pitts W.M., Yang J.C., Blais M., Joyce A.* Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Pp. 17457–17469. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.03.074
20. *Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М.* Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // *Химическая промышленность*. 1988. № 12. С. 728–731.
21. *Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.V.* Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 8927–8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
22. *Makarov D., Shentsov V., Kuznetsov M., Molkov V.V.* Pressure peaking phenomenon: model validation against unignited release and jet fire experiments // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Pp. 9454–9469. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.162
23. *Brennan S., Molkov V.* Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Pp. 8159–8166. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.08.036
24. *Zhiyong Li, Yiyang Luo.* Comparison of hazard distances and accident duration between hydrogen vehicles and CNG vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 8954–8959.
25. *Bauwens C.R., Dorofeev S.B.* CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Pp. 20447–20454.
26. *Lack A.W., Gaathaug A.V., Vaagsaether K.* Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen release in confined spaces — Large scale experiments // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 32702–32712.
27. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 478 с.
28. *Зельдович Я.Б., Воеводский В.В.* Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. Алма-Ата : Казахский государственный университет. 2004. 210 с.
29. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / под ред. А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко. Т. 1, 2. М. : Химия, 1990.*

REFERENCES

1. *Shebeko Yu.N.* Normative documents on fire safety of infrastructure objects of hydrogen energetic. *Pozarnaya Bezopasnost/Fire Safety*. 2020; 4:36-42. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.003 (rus).
2. *Shebeko Yu.N.* Fire safety of hydrogen filling stations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. (rus).
3. *Povalyaev A.E., Kolbasov A.F., Kozlov V.N.* Safety of transport on hydrogen fuel. *Alternative Fuel Transport. Special issue*. 2021; 25-30.(rus).
4. *Hansen O.R.* Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environment Protection*. 2020; 143:164-176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
5. *Hansen O.R.* Liquid hydrogen releases show dense gas behavior. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:1343-1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
6. *Fridrich A., Breitung W., Stern G., Veser A., Kuznetsov M.* Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37:17589-17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070
7. *Makeev V.I.* Safety of objects with an application of liquid cryogenic products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):34-45. (rus).
8. *Bolodian I.A., Kestenboym H.S., Makhviladze G.M., Makeev V.I., Fedotov A.P., Chuguev A.P.* Fire and explosion hazard of low temperature clouds of hydrogen in atmosphere. *Heterogeneous and Gas Systems Combustion : Proceedings of the 9th All-Union Symposium on Combustion and Explosion*. Chernogolovka, Institute of Chemical Physics, 1989; 15-17. (rus).

9. Yang F., Wang T., Deng X., Dang J., Huang Z., Hu S. et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46:31467-31488. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005
10. Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 72:104569. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104569
11. Pique S., Wienberger B., De-Dianous V., Debray B. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7429-7439. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.158
12. Tsunemi K., Kihara T., Kato E., Kawamoto A., Saburi T. Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:23522-23531. DOI:10.1016/j.ijhydene.2019.07.027
13. Shirvill E.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Sathiah P. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility — Part 1: Experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:7618-7642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.135
14. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., Cronin P.M., Jonson D.M., Cleaver R.P. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007; 32:2162-2170. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019
15. Pan X., Li Z., Zhang C., Lv H., Liu S., Ma J. Safety study of wind-solar hybrid renewable hydrogen refueling station in China. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41:13315-13321.
16. Karpov V.L. Fire safety of regular and accidental releases of flammable gases. Part 1. Limiting conditions of stable combustion and extinguishing of jet flames in a still air. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(3):36-43. (rus).
17. Saffers J.-B., Molkov V.V. Towards hydrogen safety engineering for reacting and non-reacting hydrogen releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26:344-350. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.05.002
18. Chance J.La, Houf W., Middleton B., Fluer L. *Analysis support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards*. SAND2009-0874. Albuquerque, Sandia National Laboratory, 2009; 121.
19. Pitts W.M., Yang J.C., Blais M., Joyce A. Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37:17457-17469. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.03.074
20. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen/air mixtures in a large volume. *Khimicheskaya Promishlennost/Chemical Industry*. 1988; 12:728-731.(rus).
21. Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.V. Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:8927-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
22. Makarov D., Shentsov V., Kuznetsov M., Molkov V.V. Pressure peaking phenomenon: model validation against unignited release and jet fire experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:9454-9469. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.162
23. Brennan S., Molkov V. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013; 38:8159-8166. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.08.036
24. Zhiyong Li, Yiyang Luo. Comparison of hazard distances and accident duration between hydrogen vehicles and CNG vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:8954-8959.
25. Bauwens C.R., Dorofeev S.B. CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39:20447-20454.
26. Lack A.W., Gaathaug A.V., Vaagsaether K. Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen release in confined spaces — Large scale experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:32702-32712.
27. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Mathematical theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1980; 478. (rus).
28. Zeldovich Ya.B., Voevodskii V.V. *Thermal explosion and a flame propagation in gases*. Alma Ata, Kazakh State University, 2004; 210. (rus).
29. *Fire and explosion hazard of substances and materials and fire extinguishing agents : handbook*. A.N. Baratov and A.Ya. Korolchenko (Eds.). Vol. 1, 2. Moscow, Khimiya Publ., 1990. (rus).

*Поступила 18.01.2022, после доработки 14.02.2022;
принята к публикации 01.03.2022*

*Received January 18, 2022; Received in revised form February 14, 2022;
Accepted March 1, 2022*

Информация об авторах

ГОРДИЕНКО Денис Михайлович, д-р техн. наук, начальник института, 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: 301154; Scopus Author ID: 2073393280; Researcher ID: 301154; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Denis M. GORDIENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Institute, 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: 301154; Scopus Author ID: 2073393280; Researcher ID: 301154; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах

Владимир Ильич Голованов^{1✉}, Геннадий Игоревич Крючков²,
Александр Николаевич Стрекалев³, Александр Александрович Комиссаров⁴,
Сергей Михайлович Тихонов⁴

¹Всероссийский 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

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

³Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Значимым недостатком расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости строительных металлоконструкций является отсутствие практической информации по особенностям изменения прочностных характеристик наиболее распространенных марок современных строительных сталей при высокотемпературном воздействии. Целью настоящей работы стало получение таких данных для проката с повышенными показателями термостойкости при нагреве до критических температур.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали образцы металлопроката классов прочности: С255 (сталь СтЗсп), С345 (сталь 09Г2С), С390 (сталь 14Г2), а также проката с повышенными показателями термостойкости С355П (сталь 06МБФ). Статические испытания механических свойств на растяжение и сжатие проводили на малогабаритных цилиндрических образцах типа В, с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев указанных образцов со скоростью не более 10 °С/мин до заданной температуры испытания, выдержку в течение 15 мин и проведение испытания на статическое одноосное растяжение/сжатие.

Результаты и обсуждение. Представлены результаты экспериментальных исследований механических свойств различных марок сталей наиболее широко применяемого в настоящее время строительного металлопроката, включая прокат с повышенными показателями термостойкости в условиях огневого воздействия. Полученные данные оформлены в виде графиков, позволяющих провести количественную оценку влияния повышения температуры в условиях огневого воздействия на прочностные характеристики строительного проката, что позволяет использовать эту информацию при проектировании и эксплуатации строительных металлоконструкций, а также при разработке расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости строительных металлоконструкций.

Заключение. Полученные данные по огнестойкости указанной металлопродукции позволяют осуществлять более обоснованное проектирование в строительстве, обеспечивая повышение безопасности и устойчивости зданий и сооружений к огневому воздействию при пожаре. Расширение возможностей для использования сортамента проката с повышенной термостойкостью позволит снизить металлоемкость и себестоимость строительства, повысит конкурентоспособность и привлекательность применения стальных конструкций в строительстве зданий и сооружений различного назначения.

Ключевые слова: огнестойкость; класс прочности; модуль упругости; предел текучести; временное сопротивление

Исследования проведены в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка и освоение инновационной технологии производства высокопрочного стального проката для изготовления строительных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости с целью обеспечения эксплуатационной безопасности производственных и гражданских объектов в экстремальных условиях» (Постановление Правительства РФ № 218 от 09.04.2010, договор № 075-11-2020-042 от 14.12.2020).

Для цитирования: Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., Комиссаров А.А., Тихонов С.М. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных

температурах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 52–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62.

✉ Голованов Владимир Ильич, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures

Vladimir I. Golovanov¹ ✉, Gennadiy I. Kryuchkov², Aleksandr N. Strekalev³,
Aleksandr A. Komissarov⁴, Sergey M. Tikhonov⁴

¹All-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

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

³Research Institute of Building Constructions (TsNIIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

⁴National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this work is to obtain experimental data on the numerical dependence between the strength characteristics of the most widely used grades of rolled structural metal products (including those featuring high heat resistance) and a critical increase in temperature.

Materials and methods. As the subject of research we used specimens of rolled metal of the following strength classes: C255 (steel St3sp), C345 (steel 09G2S), C390 (steel 14G2), and rolled metal that had high heat resistance properties S355P (steel 06MBF). Small cylindrical specimens of type B, with M10 thread on heads and the working diameter of 4 mm were used to conduct the static tension and compression tests of mechanical properties. The procedure encompassed the heating of the specimens to the pre-set testing temperature at the rate of not more than 10 °C/min, their 15-minute exposure, and testing for static uniaxial tension/compression.

Results and discussion. The results of the experimental research on mechanical properties of different widely used grades of rolled structural steel, including heat resistant rolled metal, subjected to the fire impact, are presented in the article. The data are presented in the form of diagrams used to make a quantitative assessment of the effect of elevated temperature on the strength properties of rolled structural metal under the impact of fire. This information can be contributed to the design and operation of structural metal constructions to develop analytical methods of identifying the fire-resistance limits of constructions made of structural metal.

Conclusion. The new data on the fire resistance of metal products allow for a more reasonable building design, higher safety and resistance of buildings and structures to the effect of fire. A wider area of application of the whole range of rolled products featuring higher heat resistance will reduce metal consumption and construction costs, boost competitiveness and attractiveness of steel structures and their application in the construction of buildings and structures of various purposes.

Keywords: fire resistance; strength class; modulus of elasticity; yield strength; temporary resistance

The research was conducted within the framework of an integrated project on the establishment of a high-tech production facility. The project is titled "Development and assimilation of an innovative high-strength rolled steel production technology towards the manufacturing of building structures featuring a regulated fire resistance limit to ensure the operating safety of production and civil engineering facilities under extreme conditions" (RF Government Resolution No. 218 of October 9, 2010, Agreement No. 075-11-2020-042 of December 14, 2020).

For citation: Golovanov V.I., Kryuchkov G.I., Strekalev A.N., Komissarov A.A., Tikhonov S.M. A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):52-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62 (rus).

✉ Vladimir Il'ich Golovanov, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Введение

В настоящее время при строительстве зданий и сооружений широко используется стальной прокат. Основным требованием к этой металлопродукции является наличие высокой конструкционной прочности, под которой следует понимать сопротивление стали нагрузкам, имеющим место при эксплуатации сооружений: статическим, ударным, циклическим. Подобные нагрузки особенно опасны при экстремальном

нагреве стальных конструкций в условиях огневого воздействия при пожаре [1–5]. В этом случае элементы стальных конструкций, каркасов зданий, оказавшиеся в зоне высоких температур, теряют свои прочностные свойства, что приводит к снижению несущей способности металлоконструкций и разрушению сооружения [6–10]. Поэтому для строительных металлоконструкций особенно важным является максимально продолжительное сохранение нормативного уровня прочностных характеристик

при воздействии высоких температур, определяемое механическими свойствами стального проката, используемого для их изготовления. Действующими строительными и противопожарными нормами устанавливаются требования к пределам огнестойкости строительных конструкций [10, 11].

Современная наука располагает определенной информацией о металлофизических процессах, определяющих изменение структурно-фазовых характеристик стального металлопроката при экстремальном нагреве, установлены общие закономерности снижения прочностных характеристик стали при повышении температуры [11–15]. Однако в настоящее время отсутствует практическая информация по особенностям изменения прочностных характеристик наиболее распространенных марок современных строительных сталей (в том числе, прокат с повышенными показателями термостойкости) от температуры при нагреве.

Основной целью данной работы является получение экспериментальных данных о численной зависимости основных прочностных характеристик наиболее распространенных марок строительного проката от повышения температуры при нагреве до критических температур, необходимых для расчета пределов огнестойкости стальных строительных конструкций.

Материалы, оборудование и методика проведения испытаний

В рамках выполнения данной работы были проведены исследования механических характеристик металлопроката при повышенных температурах в соответствии с ГОСТ 9651–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах». Использовали образцы проката классов прочности: С255, С345, С390, а также огнестойкого проката С355П. Статические испытания механических свойств на растяжение и сжатие проводили на малогабаритных цилиндрических образцах типа В, с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев указанных образцов со скоростью не более 10 °С/мин до заданной температуры испытания, выдержку в течение 15 мин и проведение испытания на статическое одноосное растяжение. При проведении испытаний температуру образцов варьировали на различном уровне от комнатной (20 °С) до 650–700 °С с шагом 50–100 °С. Скорость движения захватов разрывной машины составляла 5 мм/мин.

Поскольку отдельные элементы металлоконструкций могут работать не только на растяжение, но и на сжатие (колонны), целесообразно оценивать

высокотемпературные прочностные характеристики рассматриваемых образцов металлопроката для этих условий нагружения. Для этого были дополнительно проведены высокотемпературные испытания малогабаритных образцов проката класса прочности С255 на сжатие по ГОСТ 25.503–97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов».

На практике для оценки уровня термостойкости проката используют коэффициент огнестойкости γ_T , который определяется как отношение предела текучести образца при температуре 600 °С к его пределу текучести при комнатной температуре $\gamma_T = \sigma_T^{600\text{ °С}} / \sigma_T^{20\text{ °С}}$, номинальное значение которого для огнестойкого проката должно соответствовать соотношению $\gamma_T \geq 0,6$. Иначе говоря, огнестойкий прокат должен характеризоваться пределом текучести при 600 °С не ниже 60 % от его номинального значения при 20 °С [16–18].

Результаты анализа испытаний по определению прочностных свойств малогабаритных образцов при высоких температурах и огневых испытаний крупногабаритных балок по ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» позволяют сделать вывод о возможности использования полученных экспериментальных данных при разработке расчетно-аналитического метода определения пределов огнестойкости стальных конструкций.

Для этого проводят теплотехнические расчеты по определению предела огнестойкости рассматриваемой металлоконструкции — критической температуры, соответствующей потере ее несущей способности, предусматривающие прочностной расчет и определение времени от начала теплового воздействия до достижения критической температуры [19–24]. Однако в настоящее время отсутствуют актуальные справочные данные об изменении прочностных параметров современного строительного металлопроката при повышенных температурах (включая прокат с повышенными показателями термостойкости), необходимые для практической реализации указанных расчетов.

Если задан требуемый предел огнестойкости конструкции (за исключением конструкций в составе противопожарных преград), не превышающий R15 (RE15, REI15), то допускается применение незащищенных стальных конструкций при условии, что их предел огнестойкости по результатам испытаний или расчетов составляет R8 и более, либо, независимо от их фактического предела огнестойкости, если их приведенная толщина металла в соответствии с п. 5.4.3 СП 2.13130.2020 составляет не менее 4,0 мм.

В соответствии с ГОСТ 27772–2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия», горячекатаный прокат, предназначенный для строительных стальных конструкций, изготавливается из металлопроката следующих классов прочности: С235, С245, С255, С345, С345К, С355, С355, С355-1, С355-К, С355П, С375, С390, С390-1, С440, С550, С590. Прочностные характеристики (класс прочности) при нормальной температуре, а также динамика изменения прочностных характеристик при повышении температуры зависят как от химического состава стали, так и от структурно-фазовых характеристик металлопроката, обусловленных технологическими режимами его производства.

Образцы строительного проката для проведения исследований прочностных характеристик при повышенных температурах выбирали исходя из следующих критериев.

1. Соответствие ГОСТ 27772–2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия».

2. Серийный выпуск металлопроката.

3. Широкое применение в строительстве.

4. Соответствие основным группам прочности.

Исходя из вышеизложенного, из каждой группы проката (включая огнестойкий) были выбраны марки стали для проведения испытаний. В рамках экспериментальных исследований были изготовлены образцы из стали следующих классов прочности:

- прокат обычной прочности — С255 (сталь Ст3сп);
- прокат повышенной прочности — С345 (сталь 09Г2С);
- прокат высокой прочности — С390 (сталь 14Г2);

- прокат с повышенными показателями термостойкости — С355П (сталь 06МБФ).

Результаты эксперимента

Характер изменения прочностных характеристик проката при нагреве, необходимых для расчета строительных металлоконструкций, установленный для исследованных образцов в ходе экспериментальных исследований, показан на графиках (рис. 1–3). Ключевым параметром для оценки огнестойкости рассматриваемых опытных образцов проката является предел текучести при огневом воздействии, поскольку именно он определяет начало и интенсивность пластической деформации строительных металлоконструкций, сопровождающейся их разрушением в условиях пожара. По действующим нормативам за условную температуру этого огневого воздействия принимается 600 °С.

Для проката относительно низкой прочности (С255, С345) модуль упругости E интенсивно снижается по мере нагрева относительно номинальных значений, имеющих место при комнатной температуре (рис. 1). Наиболее медленно данный параметр снижается при нагреве огнестойкого проката С355П. Соответственно, можно считать, что прокат с повышенными показателями термостойкости сохраняет достаточно высокую упругую составляющую деформации до 700 °С без разрушения.

Изменение предела текучести при повышении температуры испытания характеризуется наиболее высокими значениями данного параметра для огнестойкого проката С355П для всех температурных точек (рис. 2). Термостойкий прокат теряет прочностные характеристики по мере нагрева менее интенсивно, чем, например, С390, хотя нормативные значения прочностных характеристик у последнего

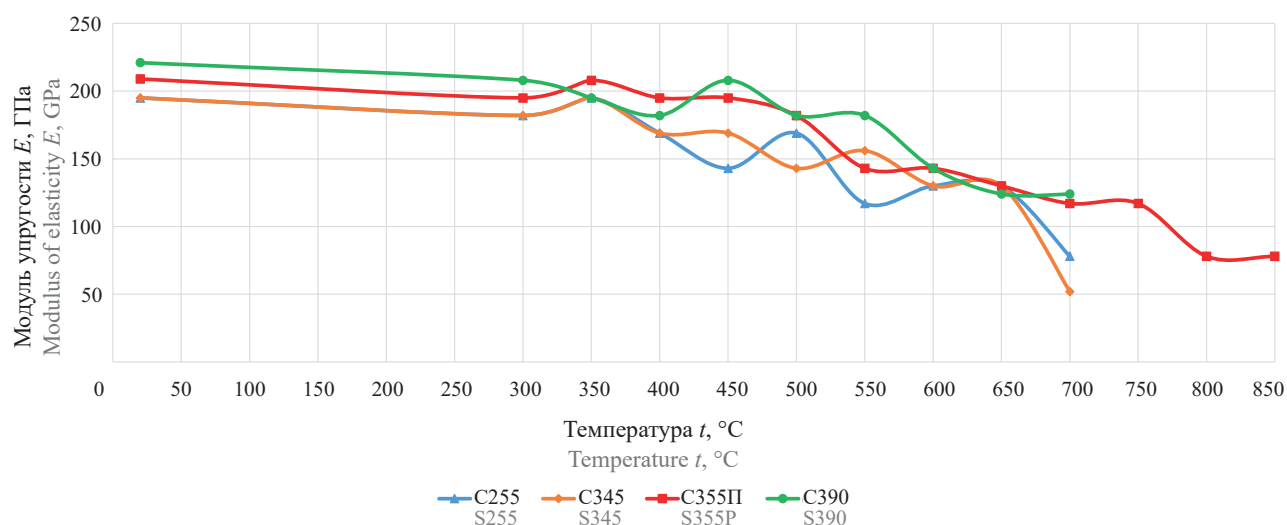


Рис. 1. График зависимости модуля упругости от температуры испытания

Fig. 1. The modulus of elasticity — test temperature dependence diagram

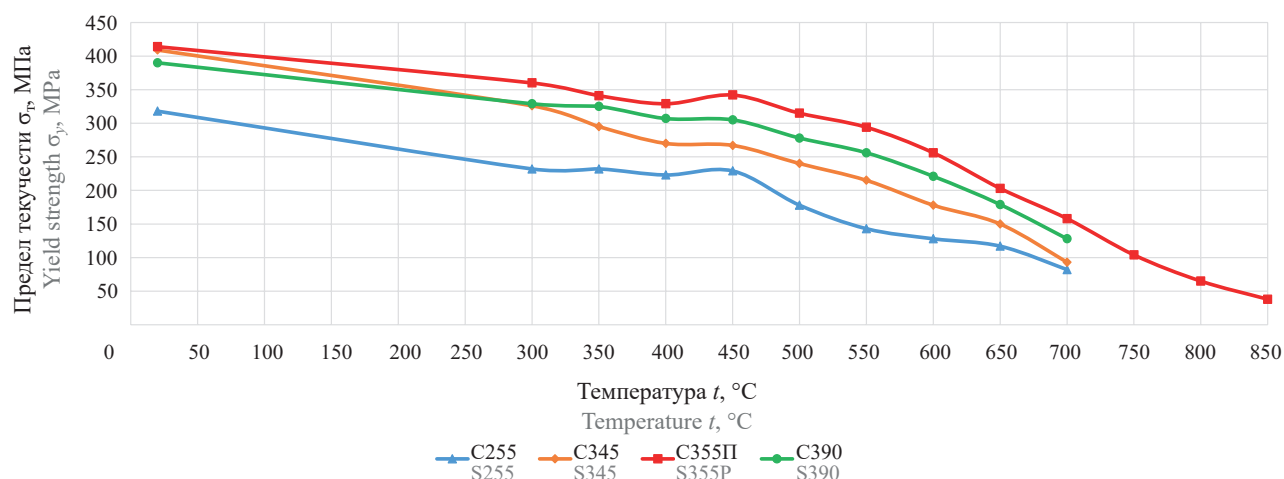


Рис. 2. График зависимости предела текучести от температуры испытания

Fig. 2. The yield strength — test temperature dependence diagram

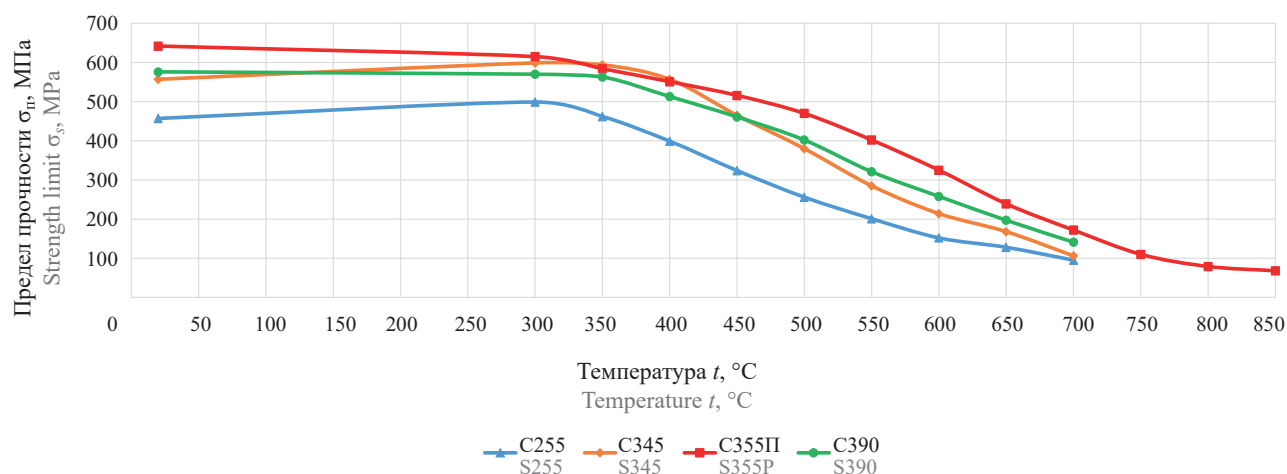


Рис. 3. График зависимости предела прочности от температуры испытания

Fig. 3. The strength limit — test temperature dependence diagram

должны быть выше. Примерно такая же зависимость характерна и для временного сопротивления (рис. 3).

Следует отметить, что для образцов проката рассматриваемого сортамента характерна более слабая зависимость предела текучести от температуры в низкотемпературной области (медленное разупрочнение), чем в высокотемпературной области (интенсивное разупрочнение). При этом медленное разупрочнение переходит в интенсивное разупрочнение при температуре около 400–450 °C. Получение сравнительно высокого уровня огнестойкости для проката C355П достигается за счет того, что интенсивное разупрочнение начинается при более высокой температуре. Это позволяет аппроксимировать зависимости прочностных характеристик от температуры в виде кусочно-гладкой функции, т.е. различных уравнений для определенных диапазонов температуры.

Диаграммы нагружения при испытаниях на растяжение и сжатие для малоуглеродистой стали

СтЗсп (класс прочности C255) имеют одинаковый характер, значения предела текучести при температуре 20 °C и при 400 °C незначительно отличаются друг от друга (таблица). Это позволяет принять допущение, что при использовании расчетно-аналитического метода определения пределов огнестойкости стальных конструкций, работающих на сжатие, возможно использование данных об изменении прочностных характеристик малоуглеродистых строительных сталей, полученных по результатам проведения высокотемпературных испытаний на растяжение.

Поскольку состав и свойства строительных сталей никогда не бывают строго одинаковыми, а результаты их испытаний отличаются значительным разбросом, для учета динамики изменения прочностных характеристик при повышении температуры могут быть использованы соответствующие усредненные кривые (рис. 4–6).

Проведенные испытания позволяют определить коэффициенты изменения механических

Результаты измерений предела текучести малоуглеродистой стали Ст3сп (класс прочности С255) при испытаниях на сжатие и растяжение

Results of measuring the yield strength of mild steel St3sp (strength class C255) in compression and tensile tests

Температура испытания, °C Test temperature, °C	При сжатии предел текучести σ_y , МПа In compression yield strength σ_y , MPa	При растяжении предел текучести σ_y , МПа Tensile yield strength σ_y , MPa
20	264	318
400	229	223

свойств проката рассмотренного сортамента при повышенных температурах (температурный коэффициент снижения модуля упругости γ_y , температурный коэффициент снижения предела текучести γ_T , температурный коэффициент снижения предела прочности γ_B). Полученные графики для образцов металлопроката С255, С345, С390 были объединены в один методом нахождения обобщенного (среднего) значения коэффициента изменения механических свойств данного сортамента.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости прочностных характеристик строительного проката от температуры испытания.

Коэффициент снижения модуля упругости определяется следующим образом:

Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20\text{ °C} < t < 300\text{ °C}$, $\gamma_y = -0,0002 \cdot t + 1,0048$;
- $300\text{ °C} < t < 400\text{ °C}$, $\gamma_y = -3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0179 \cdot t - 2,0267$;
- $400\text{ °C} < t < 700\text{ °C}$, $\gamma_y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,013 \cdot t + 3,0058$.

Марка класса прочности С355П в диапазонах:

- $20\text{ °C} < t < 300\text{ °C}$, $\gamma_y = -0,0003 \cdot t + 1,005$;
- $300\text{ °C} < t < 550\text{ °C}$, $\gamma_y = -3 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0066 \cdot t - 1,5265$;

- $550\text{ °C} < t < 850\text{ °C}$, $\gamma_y = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0217 \cdot t - 4,2679$.

Коэффициент снижения предела текучести определяется следующим образом.

Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20\text{ °C} < t < 400\text{ °C}$, $\gamma_T = -0,0007 \cdot t + 1,0147$;
- $400\text{ °C} < t < 700\text{ °C}$, $\gamma_T = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$.

Марка класса прочности С355П в диапазонах:

- в диапазоне $20\text{ °C} < t < 400\text{ °C}$, $\gamma_T = -0,0005 \cdot t + 1,0147$;
- в диапазоне $400\text{ °C} < t < 850\text{ °C}$, $\gamma_T = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$.

Коэффициент снижения предела прочности определяется следующим образом.

Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20\text{ °C} < t < 300\text{ °C}$, $\gamma_B = -0,0002 \cdot t + 0,9962$;
- $300\text{ °C} < t < 700\text{ °C}$, $\gamma_B = 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0108 \cdot t - 0,2295$.

Марка класса прочности С355П:

- $20\text{ °C} < t < 300\text{ °C}$, $\gamma_B = -0,0001 \cdot t + 1,0029$;
- $300\text{ °C} < t < 850\text{ °C}$, $\gamma_B = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0082 \cdot t - 0,1936$.

Полученные результаты подтверждают, что металлопрокат с повышенными показателями

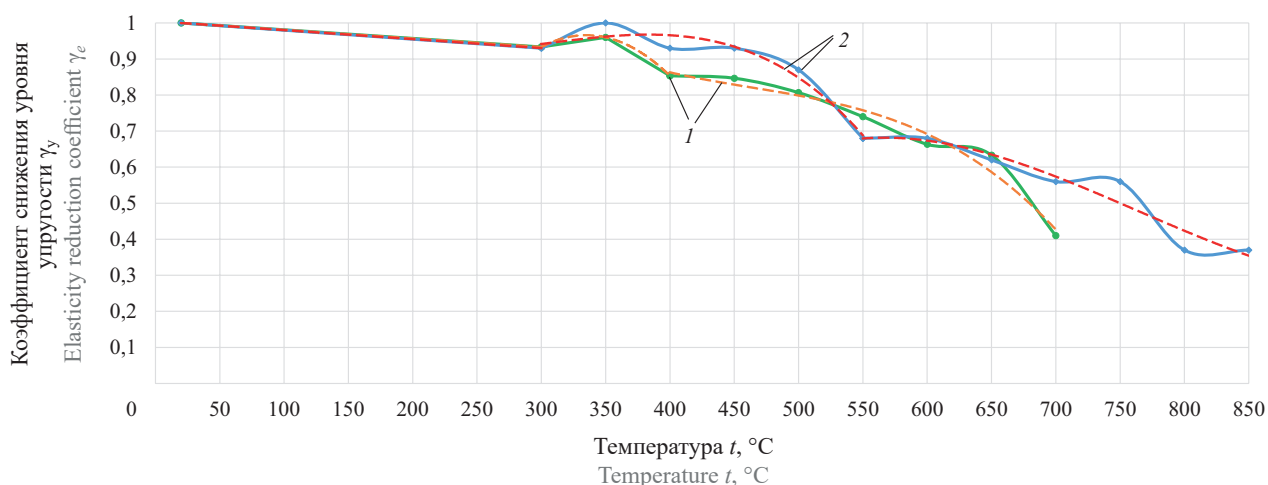


Рис. 4. Изменение коэффициента снижения модуля упругости строительных сталей (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — С255, С345, С390; 2 — С355П

Fig. 4. A change in the reduction coefficient of the modulus of elasticity of structural steels (including heat-resistant rolled steel) at elevated test temperature: solid line — the experiment; dashed line — the calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P

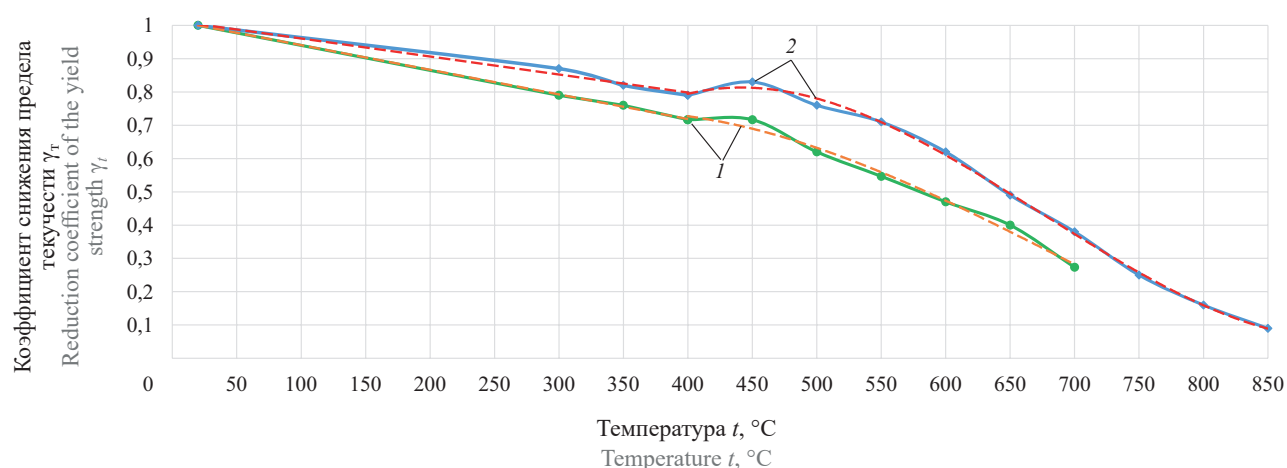


Рис. 5. Изменение коэффициента снижения предела текучести строительного проката (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355П

Fig. 5. A change in the reduction coefficient of the yield strength of rolled structural steel (including heat-resistant rolled steel) at elevated test temperature: solid line — the experiment; dashed line — the calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P

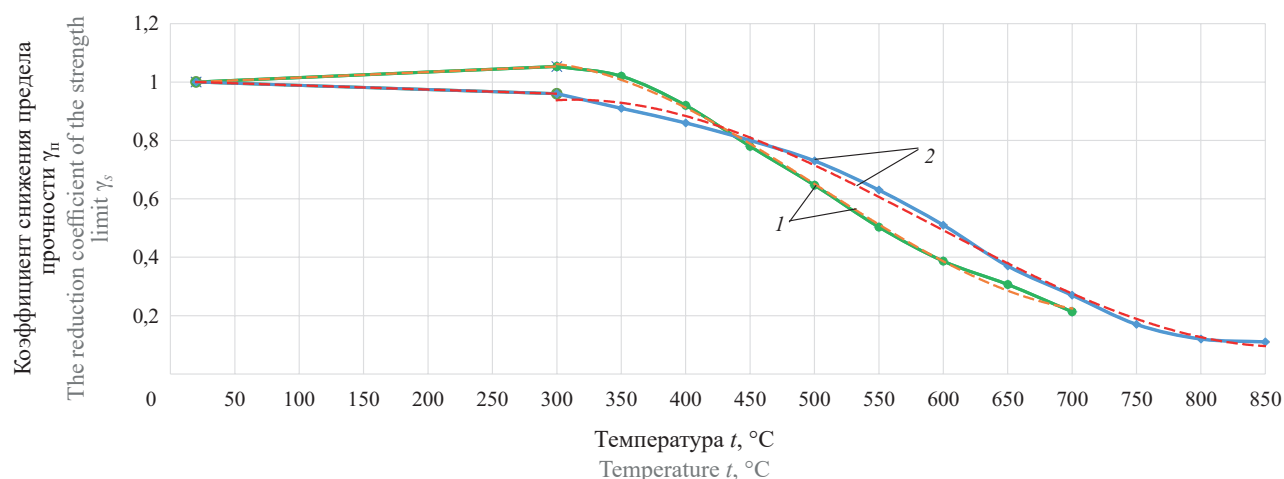


Рис. 6. Изменение коэффициента снижения предела прочности строительных сталей (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355П

Fig. 6. A change in the reduction coefficient of the strength limit of structural steels (including heat-resistant rolled products) at elevated test temperature: solid line — experiment; dashed line — calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P

термостойкости имеет более высокие показатели сохранности прочностных характеристик в области температур огневого воздействия при пожаре. Применение огнестойкого проката при изготовлении строительных металлоконструкций может рассматриваться как один из способов повышения огнестойкости зданий и сооружений, наряду с огнезащитными покрытиями.

Анализ технического регулирования в области строительства показывает, что в Российской Федерации действует комплекс нормативных технических и методических документов, определяющих регламент оценки огнестойкости строительных металлоконструкций и их применения.

Вместе с тем до настоящего времени остается открытым ряд вопросов в этой области. Не отработана методика практического применения расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости стальных строительных конструкций, предусмотренных частью 10 ст. 87 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Также необходимо отметить, что в отечественных строительных нормах не учитывается возможность применения современных сталей с повышенными показателями термостойкости для обеспечения требуемой пожарной устойчивости зданий и сооружений. Это определяет целесо-

образность разработки предложений по корректировке действующих и подготовки новых нормативных документов (национальных стандартов, сводов правил и т.п.), учитывающих возможность использования строительных металлоконструкций из термостойкого проката, что позволит снизить стоимость и сократить сроки строительства при обеспечении необходимого уровня пожарной безопасности.

Выводы

Проведены исследования механических и эксплуатационных свойств наиболее распространенных видов низколегированного проката, используемых для изготовления строительных металлоконструкций, включая термостойкий прокат, обладающий повышенной сопротивляемостью к высокотемпературному воздействию.

По результатам проведенных испытаний образцов проката различных классов прочности С255 (сталь СтЗсп), С345 (сталь 09Г2С), С390 (сталь 14Г2), включая класс прочности с повышен-

ными показателями термостойкости С355П (сталь 06МБФ), определены показатели их прочностных характеристик при повышенных температурах, которые могут быть использованы при проектировании и изготовлении металлоконструкций строительного назначения, а также при разработке расчетно-аналитических методов определения пределов их огнестойкости. Рассмотрена динамика изменения этих свойств в процессе нагрева металлопроката в диапазоне температур, установленном для термостойких сталей.

Полученные данные по огнестойкости указанной металлопродукции позволяют осуществлять более обоснованное проектирование в строительстве, обеспечивая повышение безопасности и устойчивости зданий и сооружений к огневому воздействию при пожаре. Расширение возможностей для использования сортамента проката с повышенной термостойкостью позволит снизить металлоемкость и себестоимость строительства, повысит конкурентоспособность и привлекательность применения стальных конструкций в строительстве зданий и сооружений различного назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
2. Голованов В.И., Пронин Д.Г. Влияние развития нормативной базы в области пожарной безопасности на применение стали в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 24–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
3. Kordina K., Meyer-Ottens C. Beton Brandschutz Handbuch. 2 Auflage. Düsseldorf : Verlag Bau + Technik, 1999. 284 p.
4. Neo Y.-S., Sanjayan J.G., Han C.-G., Han M.-C. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. Issue 10. Pp. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011
5. Дешевых Ю.И. Гармонизация российских и международных нормативных документов в области пожарной безопасности // Стандарты и качество. 2013. № 10. С. 42–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20465897>
6. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Огнезащита стальных и железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 9. С. 50–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-50-56
7. Zilch K., Müller A., Reitmayer C. Erweiterte Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. URL: <https://www.zm-i.de/wp-content/uploads/2021/03/erweiterte-zonenmethode-zur-brandschutztechnischen-bemessung-von-stahlbetonstuetzen.pdf> (дата обращения: 30.06.2021).
8. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
9. Gravit M., Klementev B., Shabunina D. Fire protection of steel structures with epoxy coatings under cryogenic exposure // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 11. P. 537. DOI: 10.3390/buildings11110537
10. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22

11. Голованов В.И., Крючков Г.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
12. Moore D.B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures // Progress in Structural Engineering and Materials. 1997. Vol. 1. Issue. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse2260010104
13. Федоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
14. Maraveas C., Irakas 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
15. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / пер. с фр. М. : Стройиздат, 1985. 216 с.
16. Комиссаров А.А., Тихонов С.М., Тен Д.В., Матросов М.Ю., Глухов П.А., Пехотилов А.В., Кузнецов Д.В. Сравнительная огнестойкость современных строительных сталей // Сталь. 2021. № 11. С. 40–45.
17. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Сталь в строительных металлических конструкциях. М. : Металлургиздат, 2018. 906 с.
18. Одесский П.Д., Кулик Д.В. Стали с высоким сопротивлением экстремальным воздействиям. М. : Интермет Инжиниринг, 2008. 239 с.
19. Ройтман В.М., Голованов В.И. Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // Пожарная безопасность. 2014. № 1. С. 86–92.
20. Гордиенко Д.М., Лагозин А.Ю., Мордвинова А.В., Шебеко Ю.Н., Некрасов В.П. Обеспечение пожарной безопасности морских стационарных нефтегазодобывающих платформ // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 136–142.
21. Гордиенко Д.М., Вогман Л.П., Горшков В.И., Шебеко Ю.Н., Мелихов А.С., Леончук П.А., Мордвинова А.В. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов, исследования и разработка нормативных документов ФГБУ ВНИИПО МЧС России в области предупреждения пожаров и взрывов // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 6. С. 5–20. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-5-20
22. Stucchi R., Amberg F. A practical approach for tunnel fire // Structural Engineering International. 2020. Vol. 30. Issue 4. Pp. 515–529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
23. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co.KG. Berlin : Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Heft 8. S. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
24. Dehn F., Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den 30-Nordtunnel in Madrid. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co. KG. Berlin : Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Heft 9. S. 729–731. DOI: 10.1002/best.200608187

REFERENCES

1. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
2. Golovanov V.I., Pronin D.G. The impact of the development of the regulatory framework in the field of fire safety on the use of steel structures in construction. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo/Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:24-29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
3. Kordina K., Meyer-Ottens C. *Beton brandschutz. Handbuch. 2 Auflage*. Düsseldorf, Verlag Bau + Technik, 1999; 284. (ger).
4. Heo Y.-S., Sanjayan J.G., Han C.-G., Han M.-C. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(10):1547-1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011
5. Deshevych Yu.I. Harmonization of the Russian and international regulatory documents in the field of fire safety. *Standards and Quality*. 2013; 10:42-43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20465897> (rus).
6. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Fire protection of steel and reinforced concrete structures of industrial buildings and structures. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 9:50-56. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-50-56 (rus).

7. Zilch K., Müller A., Reitmayer C. *Erweiterte zonenmethode zur brandschutztechnischen bemessung von stahlbetonstützen*. URL: <https://www.zm-i.de/wp-content/uploads/2021/03/erweiterte-zonenmethode-zur-brandschutztechnischen-bemessung-von-stahlbetonstutzen.pdf> (accessed: June 30, 2021).
8. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004 (rus).
9. Gravit M., Klementev B., Shabunina D. Fire protection of steel structures with epoxy coatings under cryogenic exposure. *Buildings*. 2021; 11(11):537. DOI: 10.3390/buildings11110537
10. Klementev B.A., Kalach A.V., Gravit M.V. A comparative analysis of the requirements of Russia and the United States to the fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 (rus).
11. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60 (rus).
12. Moore D.B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1997; 1(1):4-9. DOI: 10.1002/pse2260010104
13. Fedorov V.S., Levitskiy V.E., Molchadskiy I.S., Aleksandrov A.V. *Fire behavior and fire danger of building designs*. Moscow, ASV Publ., 2009; 408. (rus).
14. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
15. Barthélémy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton — acier — bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978; 216. (fra).
16. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A., Pekhotikov A.V., Kuznetsov D.V. Comparative fire resistance of modern building steels. *Steel*. 2021; 11:40-45. (rus).
17. Odessky P.D., Vedyakov I.I. *Steel in building metal structures*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2018; 906. (rus).
18. Odessky P.D., Kulik D.V. *Steels with high resistance to extreme impacts*. Moscow, Internet Engineering Publ., 2008; 239. (rus).
19. Roytman V.M., Golovanov V.I. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2014; 1:86-93. (rus).
20. Gordiyenko D.M., Lagozin A.Yu., Mordvinova A.V., Shebeko Yu.N., Nekrasov V.P. Fire protection support of fixed offshore platforms for oil and gas reduction. *Scientific-Technical Collection Book "Vesti gazovoy nauki"*. 2019; 2(39):136-142. (rus).
21. Gordienko D.M., Vogman L.P., Gorshkov V.I., Shebeko Yu.N., Melihov A.S., Leonchuk P.A., Mordvinova A.V. Ensuring fire safety of production objects, researches and development of normative documents of FGBU VNIPO EMERCOM of Russia in the field of fires and explosions prevention. *Occupational Safety in Industry*. 2017; 6:5-20. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-5-20 (rus).
22. Stucchi R., Amberg F. A practical approach for tunnel fire. *Structural Engineering International*. 2020; 30(4):515-529. DOI:10.1080/10168664.2020.1772697
23. Dehn F., Werther N., Knitl J. Gro_brandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-636 DOI: 10.1002_best.200608186 (ger).
24. Dehn F., Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den 30-Nordtunnel in Madrid. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co.KG. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(9):729-731. DOI: 10.1002/best.200608187 (ger).

Поступила 09.03.2022, после доработки 28.03.2022;

принята к публикации 04.04.2022

Received March 9, 2022; Received in revised form March 28, 2022;

Accepted April 4, 2022

Информация об авторах

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обо-

Information about the authors

Vladimir I. GOLOVANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and

роны 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: 731807; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgoll@yandex.ru

КРЮЧКОВ Геннадий Игоревич, адъюнкт, 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: 1106326; Researcher ID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

СТРЕКАЛЕВ Александр Николаевич, заведующий сектором, Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), НИЦ «Строительство», Россия, 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, стр. 1; РИНЦ ID: 761041; ORCID: 0000-0001-6146-7833; e-mail: alstrek@mail.ru

КОМИССАРОВ Александр Александрович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1; РИНЦ ID: 755807; Scopus Author ID: 56553875000; Researcher ID: G-6717-2014; ORCID: 0000-0001-5125-9870; e-mail: komissarov.alex@gmail.com

ТИХОНОВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1; РИНЦ ID: 597006; Scopus Author ID: 7004844557; Researcher ID: AGJ-2867-2022; ORCID: 0000-0001-5305-9899; e-mail: tserg491@yandex.ru

Вклад авторов:

Голованов В.И. — научное руководство, обоснование концепции исследования, итоговые выводы, утверждение окончательного варианта статьи.

Крючков Г.И. — проведение исследования, проведение статистического анализа, подготовка и редактирование текста.

Стрекалев А.Н. — планирование исследований, анализ и обобщение данных литературы, доработка текста, итоговые выводы.

Комиссаров А.А. — проведение исследования, анализ и систематизация экспериментальных данных, развитие методологии, доработка текста.

Тихонов С.М. — проведение исследования, развитие методологии, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 731807; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgoll@yandex.ru

Gennadiy I. KRYUCHKOV, Adjunct, 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: 1106326; Researcher ID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

Aleksandr N. STREKALEV, Head of Sector, Research Institute of Building Constructions (TsNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2-ya Institutskaya St., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation; ID RISC: 761041; ORCID: 0000-0001-6146-7833; e-mail: alstrek@mail.ru

Aleksandr A. KOMISSAROV, Cand. Sci (Eng.), Head of Laboratory, National University of Science and Technology "MISIS", Leninskiy Prospect, 4, bld. 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RISC: 755807; Scopus Author ID: 56553875000; Researcher ID: G-6717-2014; ORCID: 0000-0001-5125-9870; e-mail: komissarov.alex@gmail.com

Sergey M. TIKHONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, National University of Science and Technology "MISIS", Leninskiy Prospect, 4, bld. 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RISC: 597006; Scopus Author ID: 7004844557; Researcher ID: AGJ-2867-2022; ORCID: 0000-0001-5305-9899; e-mail: tserg491@yandex.ru

Contribution of the authors:

Vladimir I. Golovanov — scientific management, justification of the research concept, final conclusions, approval of the final version of the article.

Gennadiy I. Kryuchkov — conducting research, conducting statistical analysis, preparing and editing the text.

Aleksandr N. Strekalev — research planning, analysis and synthesis of the literature, finalization of the text, final conclusions.

Aleksandr A. Komissarov — conducting research, analyzing and systematizing experimental data, developing methodology, finalizing the text.

Sergey M. Tikhonov — conducting research, developing methodology, finalizing the text.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 63–70
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2022; 31(2):63-70

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.849

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.63-70>

Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса

Сергей Георгиевич Немчинов¹, Сергей Георгиевич Цариченко²✉

¹ Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», г. Петрозаводск, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Важным фактором надежной работы всего топливно-энергетического комплекса является обеспечение пожарной безопасности технологического оборудования, предназначенного для транспортировки и распределения электроэнергии (силовые подстанции, трансформаторные блоки), нефтепродуктов и горючего газа (компрессорные и насосные магистральные станции), которые представляют собой автономные и малообслуживаемые объекты, находящиеся на удаленных территориях.

Проблематика вопроса. Противопожарная защита автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК, к которым относятся силовые подстанции, магистральные компрессорные и насосные станции, в настоящее время основывается на использовании оперативных средств и подразделений, которые, с учетом экономической нецелесообразности их создания на этих объектах, а также их удаленности от объектов, не всегда обеспечивают надежную и эффективную защиту. Предлагается рассмотреть вопрос целесообразности применения автоматических систем противопожарной защиты, работающих в автономном режиме с использованием роботизированных установок пожаротушения и водопеночных теплозащитных экранов.

Результаты исследований. Обоснована возможность противопожарной защиты автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК с использованием водопеночных теплозащитных экранов и стационарных роботизированных установок пожаротушения, функционирующих в режиме автономного управления и обеспечивающих своевременную и достаточно эффективную защиту за счет снижения теплового воздействия от внешних очагов пожаров без привлечения оперативного персонала.

Выводы. Обеспечение пожарной безопасности автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК автоматическими установками пожаротушения с использованием роботизированных лафетных стволов и водопеночных теплозащитных экранов представляется эффективной альтернативой существующим принципам противопожарной защиты с использованием оперативных подразделений.

Ключевые слова: противопожарная защита; автономное управление; природный пожар; водопеночный теплозащитный экран; роботизированная установка пожаротушения

Для цитирования: Немчинов С.Г., Цариченко С.Г. Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 63–70. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.63-70

✉ Цариченко Сергей Георгиевич, e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Automatic and robotized firefighting systems at self-contained and low-maintenance facilities of the fuel and energy sector as an alternative to quick response teams

Sergey G. Nemchinov¹, Sergey G. Tsarichenko²✉

¹ “FR” Engineering Centre of Fire Robots Technology, Petrozavodsk, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. An important factor of the proper operation of the whole fuel and energy sector is the fire safety of its process facilities, designated for the transportation and distribution of electricity (power stations, transformer units), oil products and combustible gas (compressors and main pumps). These items of equipment are self-contained low-maintenance facilities located in remote areas.

Scope of problems. The fire safety of self-contained low-maintenance fuel and energy facilities, including power stations, compressors and main pumps, entails the involvement of the field forces that cannot ensure reliable and effective fire protection at all times, given the economic inexpediency of their establishment at these facilities or their remoteness from the facilities. The authors propose using automatic fire safety systems composed of robotized fire extinguishing units and water film heat shields that may operate in the stand-alone mode.

Research results. The authors have proven the ability of water film heat shields and stationary robotized fire extinguishing systems to ensure the fire safety of self-contained low-maintenance fuel and energy facilities. The proposed items of equipment should operate in the autonomous control mode that ensures timely and sufficiently effective fire protection by reducing the thermal impact of outdoor fires without the involvement of quick response teams.

Conclusions. Given the need to ensure fire safety, the use of self-contained and low-maintenance fuel and energy facilities equipped with automatic fire extinguishing units that have robotized water monitors and water film heat shields is an effective alternative to quick response teams.

Keywords: fire protection; autonomous control; natural fire; water film heat shield; robotized fire extinguishing system

For citation: Nemchinov S.G., Tsarichenko S.G. Automatic and robotized firefighting systems at self-contained and low-maintenance facilities of the fuel and energy sector as an alternative to quick response teams. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):63-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.63-70 (rus).

✉ Sergey Georgievich Tsarichenko, e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Введение

Объекты топливно-энергетического комплекса, к которым относятся промышленные объекты, связанные с добычей и производством первичных энергетических ресурсов, их переработкой в другие виды топлива и преобразованием в другие виды энергии (электрическая, тепловая энергия и др.), а также транспортировкой и распределением по потребителям, являются стратегически важными для экономики и безопасности страны. Важным фактором надежности работы этих объектов является обеспечение их пожарной безопасности. Вопросам обеспечения пожарной безопасности таких объектов посвящено достаточно большое количество работ [1–6], в которых рассматриваются вопросы как профилактических мероприятий, так и оперативно-тактические способы предотвращения и борьбы с пожарами. Однако в основном в этих исследованиях представлены сценарии пожаров и способы борьбы с ними, обусловленные технологическими авариями, связанными с электротехническими повреждениями, разгерметизацией технологического оборудования, взрывами и воспламенением емкостей с горючими жидкостями и газами, которые могут иметь место на крупных электроэнергетических объектах, таких как АЭС, ГРЭС, ТЭЦ и крупных предприятиях добычи и переработки нефти и газа.

При этом значительная часть технологического оборудования, предназначенного для транспортировки и распределения электроэнергии (силовые подстанции, трансформаторные блоки), нефтепродуктов и горючего газа (компрессорные

и насосные магистральные станции), представляет автономные и малообслуживаемые объекты (рис. 1). Они находятся на удаленных территориях и для них серьезную опасность представляют как пожары, обусловленные техногенными причинами, так и природными условиями (лесные и ландшафтные пожары) [7, 8], что приведет к их повреждению или полному уничтожению.

Проблематика вопроса

Проблема обеспечения противопожарной защитой таких объектов от воздействия природных пожаров заключается в том, что эффективность первичных средств пожаротушения и людских ресурсов технологического персонала объекта для оказания эффективного противодействия развивающемуся природному пожару представляется явно недостаточной, особенно в случае развития верхового лесного пожара, скорость развития которого может достигать более 100 м/мин [9]. Кроме того, отдельные энергетические объекты функционируют автономно, без присутствия обслуживающего персонала. Размещение отдельных постов пожарной охраны, способных оказать эффективное противодействие природным пожарам, оснащенных необходимой техникой пожаротушения, на малообслуживаемых объектах представляется экономически не целесообразным. В этом случае возможным способом противопожарной защиты распределенных объектов ТЭК является привлечение региональных оперативных подразделений противопожарной службы (государственной,



Рис. 1. Автономные и малообслуживаемые объекты ТЭК

Fig. 1. Self-contained and low-maintenance fuel and energy facilities

ведомственной, добровольной). При этом своевременное прибытие и участие в противопожарной защите объекта может быть существенно затруднено вследствие удаленности или складывающейся оперативной обстановки. Также необходимо учитывать, что при верховых пожарах тепловое воздействие от очага горения, распространяющегося со скоростью до 100 м/мин, может достигать значительных величин, в результате чего потеря несущей способности стенки трансформатора может наступить на 7–12-й минуте, а самовоспламенение трансформаторного масла на 5–7-й минуте [10]. Эффективным, но не всегда реализуемым способом защиты является организация противопожарных разрывов в виде минерализованных полос, величина которых, применительно к отдельным объектам энергетики, может достигать 250–270 м [11] и более. В качестве альтернативы рассмотренным выше традиционным способам противопожарной защиты объектов ТЭК от воздействия внешних очагов пожара предлагаются автоматические установки пожаротушения с использованием водо пленочных теплозащитных экранов и стационарных роботизированных установок пожаротушения. Предлагаемый способ позволяет своевременно обнаружить опасный уровень теплового воздействия от внешних очагов пожара и обеспечить необходимую и достаточную защиту без привлечения значительных оперативных средств на время, необходимое для ликвидации источников теплового воздействия.

Решение проблемы

Предлагаемый подход к решению противопожарной защиты автономных и малообслуживаемых компактных объектов ТЭК предусматривает создание защиты от теплового воздействия внешнего пожара с использованием водо пленочных теплозащитных экранов, обеспечивающих тепловую защиту в автоматическом режиме в случае



возникновения риска возникновения тепловых потоков, превышающих 5 кВт/м² (рис. 2). Конструктивной особенностью водо пленочных экранов является формирование устойчивой водяной пленки на сеточной поверхности, позволяющей обеспечивать кратность ослабления теплового потока в 50 раз, при величине максимального теплового потока до 60 кВт/м² и расходе воды 0,06–0,10 л/с·м² [12].

Предполагается, применительно к автономным и малообслуживаемым объектам ТЭК, оборудовать технологическое оборудование и строения в направлении потенциально опасного воздействия очага горения наружного пожара. Учитывая незначительные расходы воды и относительно небольшие площади критически важных технологических устройств, подлежащих защите, представляется возможным использовать компактные резервуарные водоисточники, расположенные на самом объекте. Предлагаемый способ позволяет существенно



Рис. 2. Общий вид секции водо пленочного теплозащитного экрана

Fig. 2. The general appearance of an element of the water film heat shield

повысить живучесть автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК в условиях внешних природных пожаров, если не полностью обеспечить защиту от теплового воздействия на протяжении всего процесса горения, то обеспечить защиту до прибытия оперативных сил и средств. Автоматическая противопожарная система защиты таких объектов с использованием водопеночных теплозащитных экранов позволяет функционировать в автономном режиме активации системы с использованием тепловых извещателей, установленных в стеновые панели или поверхности защищаемого объекта или технологического оборудования, основываясь на результатах исследований [13].

В случае необходимости обеспечить противопожарную защиту крупных автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК (рис. 3) как от внешнего воздействия природного пожара, так и для локализации и подавления очагов горения технологического оборудования и сооружений, целесообразно применение стационарных роботизированных установок пожаротушения (РУП), представляющих комплекс автоматической системы обнаружения возможного очага горения и системы управления подачей огнетушащего средства непосредственно в очаг пожара (рис. 4).

В работе [14] была показана эффективность возможного применения роботизированных установок пожаротушения для защиты морских нефтедобывающих платформ. Особенностью развития таких пожаров является высокая динамика развития, ограниченность человеческих ресурсов, задерживаемых в тушении, и значительное время прибытия основных сил и средств. В этих условиях высокую эффективность демонстрируют роботизированные лафетные установки пожаротушения, способные работать как в режиме дистанционного управления,



Рис. 3. Пример использования РУП для защиты трансформаторной подстанции

Fig. 3. The use of a robotized fire-fighting system responsible for the fire safety of a transformer station

так и автономно, руководствуясь командами управления на основе решения интеллектуальных задач в условиях меняющихся условий недетерминированной обстановки пожара.

Реализация принципа локализации и подавления очага пожара без непосредственного присутствия оперативного персонала в рабочей зоне РУП обеспечивается различными режимами функционирования автономной системой пожаротушения на основе компьютерного зрения с обратной связью

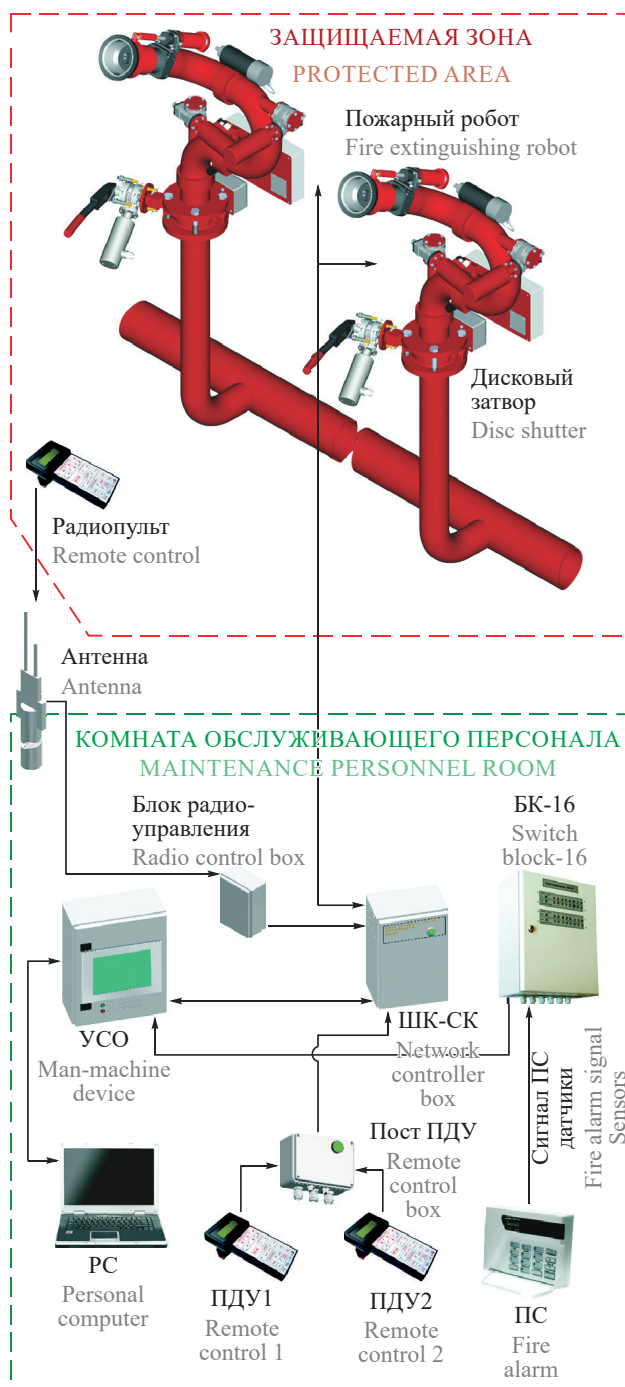


Рис. 4. Принципиальная схема роботизированной установки пожаротушения

Fig. 4. The principle diagram of a robotized fire-fighting system

в реальном времени о размере пожара и направлении подачи огнетушащего средства.

В этом плане интересными представляются исследования по применению автономной системы пожаротушения с использованием роботизированных лафетных стволов на основе системы технического зрения с обратной связью в реальном времени о размере пожара и направлении подачи огнетушащего состава [15]. Здесь предлагается использовать обработку стереосигнала для фиксации точек вдоль траектории распыления для корректировки угла рыскания и тангажа. Поиск оптимального сечения с линейной оптимизацией по методу наименьших квадратов использовался для определения оптимального угла наклона положения подачи огнетушащего вещества в каждый момент выборки. Предлагаемая система может быть реализована на роботизированной пожарной платформе для автономного обнаружения пожара, выбора правильной цели манипулирования и подавления полномасштабных пожаров с учетом помех, вызывающих ошибочное наведение. Аналогичное решение было предложено в работе [16], где в качестве системы технического зрения была разработана комплексированная система, в состав которой входят 3D-лазерный сенсор, цветная видеокамера и тепловизор, что позволяет также оптимизировать режим подачи огнетушащего вещества в недетерминированных внешних условиях, производя корректировку углов наведения лафетного ствола.

В предлагаемом нами решении предполагается возможность обнаружения очага горения или потенциально опасного объекта с повышенным температурным уровнем в диапазоне ИК-спектра наблюдения. В случае превышения допустимого порогового значения осуществляется активация всей системы, заключающаяся в формировании сигнала тревоги, запуске насосов подачи огнетушащих веществ, открытии необходимых трубопроводов и наведении автоматических лафетных стволов на объект защиты. Аналогичный алгоритм функционирования ин-

теллектуальных систем управления пожаротушением с использованием дистанционно-управляемых мониторов представлен в работе [17].

В случае защиты технологического оборудования и сооружений объектов ТЭК от внешнего теплового воздействия природного или техногенного пожара целесообразно обеспечить подачу воды для охлаждения защищаемой поверхности. Определение зоны орошения и требуемой интенсивности подачи воды определяется на основании результатов мониторинга температурного состояния поверхностей объекта с использованием также аппаратуры тепловизионного контроля. Исследования, проведенные по оценке эффективности и надежности активации различных типов противопожарных робототехнических комплексов [18, 19] с последующим наведением на очаг горения и его тушением с использованием ИК-аппаратуры в различных условиях и при наличии помех, показали надежность данного способа.

Управление подачей огнетушащего состава может осуществляться в различных режимах:

- дистанционное удаленное управление оператором с использованием видеоизображения, получаемого по каналу технического зрения комплекса;
- автоматическая селекция очага горения и наведение лафетных стволов на очаг с последующей подачей огнетушащего состава.

В режиме автоматического управления наведением лафетного ствола необходимо обеспечить подачу огнетушащего состава непосредственно в очаг горения или на защищаемую поверхность. Для этого используется программа расчета баллистики струи (рис. 5), позволяющая управлять процессом тушения с учетом интенсивности подачи.

В основу алгоритма расчета траектории осесимметричной струи воды, создаваемой лафетными роботами, могут быть положены теоретические методы расчета, основанные на алгоритмах построения траектории осесимметричной струи воды, созда-

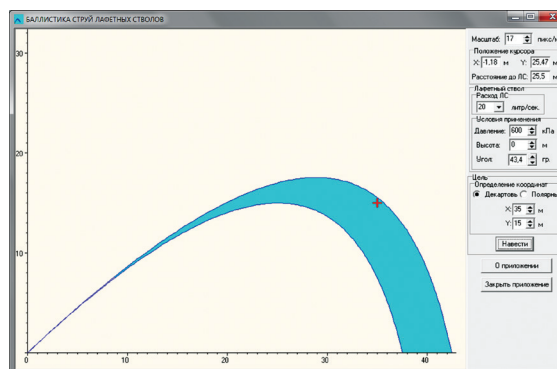
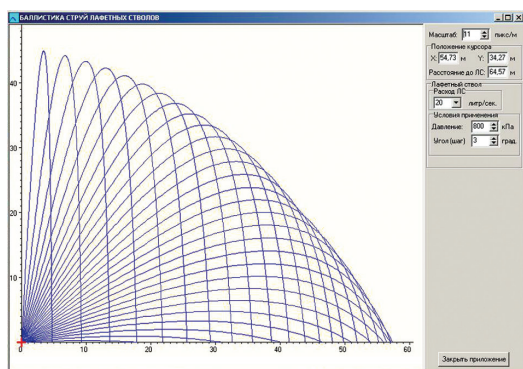


Рис. 5. Расчет траекторий струй и определения угла наведения струи к точке цели

Fig. 5. Calculation of the jet path and the jet point angle needed to reach the target

ваемой лафетными роботами, с учетом состояния слоя атмосферного трения на его боковой поверхности [20]. При этом не учитывается диссипация струи на финишной части траектории, где происходит существенное разрушение струи. Предлагаемый здесь алгоритм управления построен с учетом экспериментально полученных данных для всего размерного ряда, производимых компанией «ЭФЭР» лафетных стволов. Полученные результаты были заложены в алгоритмы программ расчета и учитывают финишную диссипацию струи, реальную интенсивность подачи огнетушащего вещества в защищаемую зону.

Выводы

Предлагаемая система автоматического пожаротушения с использованием роботизирован-

ных лафетных стволов и водопеночных теплозащитных экранов представляется эффективной альтернативой существующим принципам защиты автономных и малообслуживаемых объектов ТЭК, позволяющей существенно сократить затраты на противопожарную защиту от техногенных и природных пожаров.

В некоторых случаях для защиты отдельных технологических установок совместно с использованием РУП целесообразно устанавливать водопеночные теплозащитные экраны, позволяющие локализовать отдельные опасные и затененные зоны, труднодоступные для подачи струй огнетушащих составов. При этом система управления функционирования экранов и стволов РУП может быть объединена в общую систему управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ищенко А.Д.* Теория локализации пожаров в зданиях объектов энергетики : дис. ... д-ра техн. наук. М. : АГПС МЧС России, 2021. 422 с.
2. *Лазаренко Б.С.* Обеспечение комплексной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса России // *Безопасность труда в промышленности*. 2018. № 4. С. 83–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32808788>
3. *Дупляков Г.С., Горбунов А.С., Елфимова М.В., Надейкин И.В.* Анализ и обобщение статистических данных по опасным техногенным явлениям на объектах нефтяной промышленности РФ // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2019. № 3 (14). С. 7–12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41153420>
4. *Клубань В.С., Молчанов С.В.* Пожарная безопасность особо важных объектов топливно-энергетического комплекса // *Технологии техносферной безопасности*. 2014. № 3 (55). Ст. 13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22880831>
5. *Кобелева И.М., Калач Е.В.* Особенности обеспечения пожарной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2017. Т. 1. С. 846–848. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37158244>
6. *Клементьев Б.А., Олейников С.Н.* Основные направления развития стандартизации: обеспечение пожарной безопасности объектов производства сжиженного природного газа // *Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году культуры безопасности*. Иваново, 2018. С. 233–239. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307945>
7. *Охрана окружающей среды в России. 2020 : стат. сб.* М. : Росстат, 2020. 113 с.
8. *Campbell R.* Fires in industrial and manufacturing properties. National Fire Protection Association, 2018. 116 p. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osIndustrial.pdf>
9. *Ступников Д.С.* Классификация лесных пожаров // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2017. № 2-1. С. 119–124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28784002>
10. *Ле Ань Туан.* Предотвращение воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама : дис. ... канд. техн. наук. М. : АГПС МЧС России, 2021. 172 с.
11. *Горюшкин С.С.* Расчет безопасного расстояния при верховом лесном пожаре от лесного массива до электрической подстанции 110 кВт // *Успехи современной науки*. 2016. Т. 8. № 12. С. 76–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27712527>
12. *Копылов Н.П., Хасанов И.Р.* Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах // *Безопасность труда в промышленности*. 2016. № 11. С. 38–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27215257>
13. *Лазарев А.А.* Наружные стеновые изделия для дистанционной диагностики пожарной безопасности малоэтажных зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново : Ивановский государственный политехнический университет, 2022. 24 с.

14. Горбань Ю.И., Горбань М.Ю., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г. Роботы-пожарные на защите морских добывающих платформ // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 8 (104). С. 78–83. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/prombezopasnost/625190-roboty-pozharnye-na-zashchite-morskikh-dobyvayushchikh-platform/>
15. McNeil J.G., Lattimer B.Y. Robotic fire suppression through autonomous feedback control // Fire Technology. 2017. Vol. 53. Issue 3. Pp. 1171–1199. DOI: 10.1007/s10694-016-0623-1
16. Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г. Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1–2. С. 121–132. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-121132 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28948290>
17. Jinsong Zhu, Wei Li, Da Lin, Hengyu Cheng, Ge Zhao. Intelligent fire monitor for fire robot based on infrared image feedback control // Fire Technology. 2020. Vol. 56. Issue 5. Pp. 2089–2109. DOI: 10.1007/s10694-020-00964-4
18. Kim J.-H., Starr J.W., Lattimer B.Y. Firefighting robot stereo infrared vision and radar sensor fusion for imaging through smoke // Fire Technology. 2015. Vol. 51. Issue 4. Pp. 823–845. DOI: 10.1007/s10694-014-0413-6
19. McNeil J.G., Starr J., Lattimer B.Y. Autonomous fire suppression using multispectral sensors // 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong, Australia, 2013. Pp. 1504–1509. DOI: 10.1109/AIM.2013.6584308
20. Pozharkova I.N. Modelling the water jet trajectory of a robotic fire monitor in the simintech dynamic modelling environment // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. 2020. Vol. 1295. Pp. 837–844. DOI: 10.1007/978-3-030-63319-6_77

REFERENCES

1. Ishchenko A.D. *Theory of localization of fires in buildings of energy facilities : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, AGPS EMERCOM of Russia Publ., 2021; 422. (rus).
2. Lazarenko B.S. Ensuring the integrated safety of objects of the fuel and energy complex of Russia. *Occupational Safety in Industry*. 2018; 4:83-85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32808788> (rus).
3. Duplyakov G.S., Gorbunov A.S., Elfimova M.V., Nadeikin I.V. Analysis and generalization of statistical data on dangerous man-made phenomena in the petroleum industry of the Russian Federation. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2019; 3(14):7-12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41153420> (rus).
4. Kluban V.S., Molchanov S.V. Fire security in special importance objects of fuel and energy complex. *Technology of Technosphere Safety*. 2014; 3(55):13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22880831> (rus).
5. Kobeleva I.M., Kalach E.V. Features of ensuring fire safety of fuel and energy complex facilities. *Problems of ensuring safety during liquidation of consequences of emergency situations*. 2017; 1:846-848. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37158244> (rus).
6. Klementyev B.A., Oleynikov S.N. The main directions of standardization development: ensuring fire safety of liquefied natural gas production facilities. *Modern fireproof materials and technologies : collection of materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Safety Culture*. Ivanovo, 2018; 233-239. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307945> (rus).
7. *Environmental protection in Russia. 2020 : Stat. collection*. Moscow, Rosstat Publ., 2020; 113. (rus).
8. Campbell R. *Fires in industrial and manufacturing properties*. National Fire Protection Association. 2018; 116. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osIndustrial.pdf>
9. Stupnikov D.S. Classification of forest fires. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2017; 2-1:119-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28784002> (rus).
10. Le An Tuan. *Prevention of the impact of a forest fire on energy facilities in Vietnam : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, AGPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 172. (rus).
11. Goryushkin S.S. Calculation of safe distance when the upper forest fire from a forest to an electric substation of 110 KW. *Successes of Modern Science*. 2016; 8(12):76-83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27712527> (rus).
12. Kopylov N.P., Khasanov I.R. Efficiency of thermal shields application for protection against thermal flows in case of fires. *Occupational Safety in Industry*. 2016; 11:38-43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27215257> (rus).

13. Lazarev A.A. *External wall products for remote diagnostics of fire safety of low-rise buildings : abstract of the diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Ivanovo, Ivanovo State Polytechnic University, 2022; 24. (rus).
14. Gorban Yu.I., Gorban M.Yu., Nemchinov S.G., Tsarichenko S.G. Robots-firefighters on protection of offshore mining platforms. *Business magazine "Neftegaz.RU"*. 2020; 8(104):78-83. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/prombezopasnost/625190-roboty-pozharnye-na-zashchite-morskikh-dobyvayushchikh-platform/> (rus).
15. McNeil J.G., Lattimer B.Y. Robotic fire suppression through autonomous feedback control. *Fire Technology*. 2017; 53(3):1171-1199. DOI: 10.1007/s10694-016-0623-1
16. Bazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Integrated SS in the control system of a fire robot. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2017; 1-2:121-132. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-121132 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28948290> (rus).
17. Jinsong Zhu, Wei Li, Da Lin, Hengyu Cheng, Ge Zhao. Intelligent fire monitor for fire robot based on infrared image feedback control. *Fire Technology*. 2020; 56(5):2089-2109. DOI: 10.1007/s10694-020-00964-4
18. Kim J.-H., Starr J.W., Lattimer B.Y. Firefighting robot stereo infrared vision and radar sensor fusion for imaging through smoke. *Fire Technology*. 2015; 51(4):823-845. DOI: 10.1007/s10694-014-0413-6
19. McNeil J.G., Starr J., Lattimer B.Y. Autonomous fire suppression using multispectral sensors. *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Wollongong, Australia, 2013; 1504-1509. DOI: 10.1109/AIM.2013.6584308
20. Pozharkova I.N. Modelling the water jet trajectory of a robotic fire monitor in the simintech dynamic modelling environment. *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems*. 2020; 1295:837-844. DOI: 10.1007/978-3-030-63319-6_77

Поступила 21.03.2022, после доработки 01.04.2022;

принята к публикации 04.04.2022

Received March 21, 2022; Received in revised form April 1, 2022;

Accepted April 4, 2022

Информация об авторах

НЕМЧИНОВ Сергей Георгиевич, генеральный директор, Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», Россия, Республика Карелия, 185031, г. Петрозаводск, ул. Заводская, 4; РИНЦ ID: 1123416; Scopus Author ID: 1123416; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: sg.nemchinov@efer.pro

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 181475; Scopus Author ID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey G. NEMCHINOV, CEO, "FR" Engineering Centre of Fire Robots Technology, LLC, Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, 185031, Republic of Karelia, Russian Federation; ID RISC: 1123416; Scopus Author ID: 1123416; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: sg.nemchinov@efer.pro

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 181475; Scopus Author ID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, 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, сносок 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