Т. 30 • №5 • 2021
5-2021

FIRE and EXPLOSION SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ / FIRE AND EXPLOSION SAFETY

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ РОССИИ И США К ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№5 ТОМ 30 2021

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 **Махиянова Е.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректор **Светличная Л.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 Росссийского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Справочно-библиографическую службу EBSCO. Сведения о журнале ежегодно публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory». Переводные версии статей журнала входят в Международный реферативный журнал Chemical Abstracts.

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

Подписано в печать 27.10.2021.
Выход в свет 29.10.2021.
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 взято с сайта: www.pexels.com

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Бакиров И.К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)
Барбин Н.М., д. т. н., к. х. н, профессор, почетный работник науки и техники РФ (Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург, Россия)
Берлин А.А., д. х. н., профессор, академик РАН (Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия)
Богданова В.В., д. х. н., профессор (Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь)
Брушлинский Н.Н., д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)
Бурханов А.И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Вагнер П., д. т. н. (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Германия)
Кузнецов С.В., д. ф.-м. н., профессор (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия)
Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия)
Малыгин И.Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)
Поландов Ю.Х., д. т. н., профессор (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)
Пузач С.В., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)
Раимбеков К.Ж., к. ф.-м. н. (Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан)
Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государственной службы, Будапешт, Венгрия)
Роу Р.Л., профессор (Школа права Университета Джорджтаун, Вашингтон, США)
Серков Б.Б., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)
Тамразян А.Г., д. т. н., профессор, действительный член Российской инженерной академии (РИА), советник РААСН (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)
Топольский Н.Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, 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, Ньютаунабби, Великобритания)
Шоус Р. (Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, Пенсильвания, США)
Якуш С.Е., д. ф.-м. н. (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Б.А. КЛЕМЕНТЬЕВ, А.В. КАЛАЧ, М.В. ГРАВИТ
Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов — 5

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера — 23

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Е.Ю. КРУГЛОВ, Р.М. АСЕЕВА
Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения — 30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Н.Г. ТОПОЛЬСКИЙ, С.Ю. БУТУЗОВ, В.Я. ВИЛИСОВ, В.Л. СЕМИКОВ
Модель эффективности реагирования в иерархической системе управления по оценкам готовности пожарных подразделений — 42

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

А.Ю. ШЕБЕКО, Ю.Н. ШЕБЕКО, А.В. ЗУБАНЬ
Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре — 58

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

С.А. ТИТОВ, Н.М. БАРБИН, А.М. КОБЕЛЕВ
Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях — 66

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

А.Н. ЧЛЕНОВ, Т.А. БУЦЫНСКАЯ
Тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации — 76

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

И.А. ПУСТОВАЛОВ
Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами — 84

ВОПРОС – ОТВЕТ

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Сухая трава и мусор в обновленной пожарной статистике — 98

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

B.A. KLEMENTEV, A.V. KALACH, M.V. GRAVIT
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 — 5

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

N.L. POLETAEV
A change in the air temperature inside a 20-liter chamber when air is added from the receiver — 23

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

E.Yu. KRUGLOV, R.M. ASEEVA
Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics — 30

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

N.G. TOPOLSKY, S.Yu. BUTUZOV, V.Ya. VILISOV, V.L. SEMIKOV
A model of response efficiency in the hierarchical control system based on the assessment of readiness of fire departments — 42

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

A.Yu. SHEBEKO, Yu.N. SHEBEKO, A.V. ZUBAN
The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire — 58

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

S.A. TITOV, N.M. BARBIN, A.M. KOBELEV
The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants — 66

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

A.N. CHLENOV, T.A. BUTCINSKAYA
Trends in the development of fire alarm system controllers for fire alarm systems — 76

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

I.A. PUSTOVALOV
An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used — 84

QUESTION – ANSWER

A.S. KHARLAMENKOV
Dry grass and rubbish in the updated fire statistics — 98

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

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

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2021

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2021

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

Сравнительный анализ требований к строительным конструкциям

Стр. 5

Стр. 30

Беспламенное горение древесины

Модель эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации

Стр. 42

Стр. 58

Расчет огнестойкости строительных конструкций на предприятиях

Стр. 66

Анализ аварийных ситуаций на АЭС

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

FIRE AND EXPLOSION SAFETY

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

No.5 VOL. 30 2021

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 Federation

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 **Makhiyanova E.V.**
Russian-English translation **Yudenkova O.V.**
Corrector **Svetlichnaya L.V.**
Layout **Aleynikova A.G.**

Address of Editorial Staff:
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia

Corresponding to: Post office box 26, Moscow, 121352, Russian Federation.

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

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

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

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

Signed for printing 27.10.2021.
Date of publication 29.10.2021.
Format is 60 × 84 1/8.
Printing is 2000 copies.
Chalk-overlay mat paper.
Offset printing. Free price.
Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house MISI – MGSU
building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.

EDITOR-IN-CHIEF:
D.A. Korolchenko, Cand. Sci. (Eng.), Academician of International Academy of Ecology and Life Safety (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
V.V. Molkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)
P.A. Strizhak, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD:
I.K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, Republic of Bashkortostan)
N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russia)
A.A. Berlin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences (Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)
N.N. Brushlinskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
A.I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
P. Wagner, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)
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 Engineering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)
N.G. Topolskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of National Academy of Fire Science, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, 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 Science (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)

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):5-22
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER
УДК 614.841
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22

Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов

Борис Александрович Клементьев[1]✉, Андрей Владимирович Калач[2], Марина Викторовна Гравит[3]

[1] Арктик СПГ 2, Новый Уренгой, Россия

[2] Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Воронеж, Россия

[3] Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время для объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России в национальных стандартах и сводах правил даны детерминированные значения пределов огнестойкости строительных конструкций, при этом вероятностный подход к определению их огнестойкости в российских нормативных документах не предусмотрен. Методология вероятностного подхода к огнестойкости конструкций подробно реализована в нормативном документе API 2218 «Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants», разработанном Американским институтом нефти.
Методы. Проведен сравнительный анализ российских нормативных документов по пожарной безопасности и американского стандарта API 2218, в части установленных концепций огнезащитной обработки и требований к пределам огнестойкости строительных конструкций объектов нефтегазовой отрасли.
Результаты. Установлено, что в Российской Федерации отсутствуют нормативные документы, устанавливающие методы вероятностного подхода, в том числе к определению требуемых пределов огнестойкости и местам нанесения огнезащитных покрытий на объектах ТЭК по аналогии с американским стандартом API 2218.
Выводы. На основании проведенного анализа сделан вывод, что подходы к определению философии огнестойкости конструкций зданий и сооружений ТЭК в рассматриваемых документах принципиально различаются. С целью совершенствования нормативно-технической базы РФ в области пожарной безопасности в части огнестойкости предлагается рассмотреть использование требований зарубежных документов, учитывающих проверенные мировые инженерно-технические практики, в частности — применение вероятностного подхода с учетом пожаров углеводородов.

Ключевые слова: предел огнестойкости; огнезащита; вероятность возникновения пожара; оценка риска; зона ожидаемого пожара; требования пожарной безопасности; пассивная противопожарная защита; строительная конструкция

Для цитирования: *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

✉ Клементьев Борис Александрович, e-mail: boris.klementev@arcticspg.ru

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

Boris A. Klementev[1]✉, Andrey V. Kalach[2], Marina V. Gravit[3]

[1] Arctic LNG 2, Novy Urengoy, Russian Federation

[2] Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

[3] Civil Engineering Institute, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, national standards and codes of practice contain deterministic values of the fire resistance of building structures of facilities of the Russian fuel and energy complex (FEC), while a probabilistic approach to determining their fire resistance is not specified in the Russian regulatory documents. The me-

© Б.А. Клементьев, А.В. Калач, М.В. Гравит, 2021

thodology of the probabilistic approach to the fire resistance of structures is detailed in API 2218 “Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants”, developed by the American Petroleum Institute.
Methods. A comparative analysis of the Russian regulatory documents on fire safety and API 2218 in terms of the established concepts of fireproofing and requirements for the fire resistance limits of building structures of oil and gas industry facilities, is carried out.
Results. It was established that the Russian Federation has no regulatory documents establishing methods based on the probabilistic approach, including determination of the required fire resistance limits and points of application of fire-resistant coatings at facilities of the fuel and energy complex by analogy with international standard API 2218.
Conclusion. Based on the analysis, it was concluded that approaches to the philosophy of the fire resistance of structures of buildings and structures of the fuel and energy complex in the documents under consideration are fundamentally different. In order to improve the Russian regulatory and technical framework, governing fire safety and fire resistance, it is proposed to consider the requirements of foreign documents that take into account proven international engineering and technical practices, in particular, the use of a probabilistic approach taking into account hydrocarbon fires.

Keywords: fire resistance limit; fireproofing; fire risk; risk assessment; fire-scenario envelope; fire safety regulations; passive fire protection; building structure

For citation: 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 (rus).

✉ Boris Aleksandrovich Klementev, e-mail: boris.klementev@arcticspg.ru

Введение

Топливно-энергетический комплекс является ключевой составляющей экономики Российской Федерации и одним из основных факторов обеспечения жизнедеятельности страны. Технологические процессы объектов обустройства нефтяных и газовых месторождений (добычи, сбора, транспорта и подготовки нефти и газа), а также технологические процессы, связанные с нефтегазопереработкой и нефтехимическим производством, сопровождаются высокой пожарной опасностью зданий и сооружений объектов ТЭК. Во-первых, пожарная опасность обусловлена обращением в технологических процессах легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и горючих газов (ЛВЖ, ГЖ и ГГ), а также хранением на объектах защиты значительного количества указанных веществ, во-вторых, сложностью технологических процессов, обеспечивающих получение продукции в нефтегазовой отрасли. Несоблюдение элементарных мер правил безопасности может стать причиной возникновения пожаров и/или взрывов с последующим горением и эскалацией аварий, что, как следствие, может привести к причинению вреда жизни и здоровью работников объектов и крупному материальному ущербу. Таким образом, при обеспечении пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса с учетом технико-экономических показателей необходимо определить концепцию и комплекс мер на этапе разработки основных технических решений и проектной документации, в том числе, что касается пассивных систем защиты (passive fire protection — PFP), — обеспечение огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений с помощью применения огнезащитных материалов.

В Российской Федерации требования к определению пределов огнестойкости реализованы на основании детерминированных значений, указанных в нормативных документах по пожарной безопасности[1–5] и других документах. При этом методика вероятностного подхода по определению требуемых пределов огнестойкости реализована в ГОСТ Р 12.3.047–2012[6] на основании работ [1, 2].

[1] Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности (ред. от 01.07.2015) : (СП 231.1311500.2015) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 17 июня 2015 г. № 302.

[2] Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности (ред. от 31.08.2015) : (СП 240.1311500.2015) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 20 августа 2015 г. № 452.

[3] Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности (ред. от 01.01.2018) : (СП 326.1311500.2017) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 27 декабря 2017 г. № 597.

[4] ВУПП-88. Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности (в ред. от 1 декабря 1988 г.) : утверждены приказом Миннефтехимпрома СССР от 17 августа 1979 г. № 726 и согласованы ГУПО МВД СССР письмом от 17 августа 1978 г. № 7/6-3191.

[5] ГОСТ Р 12.3.047–2012. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст.

[6] API 2218. Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants. 3rd ed. American Petroleum Institute, 2013.

Указанная методика может быть использована для подтверждения принимаемых пределов огнестойкости в случае отсутствия нормативных требований к объектам проектирования, а именно, при разработке специальных технических условий по пожарной безопасности. Эта методика не нашла широкого практического применения инженерами по пожарной безопасности при проектировании и разработке специальных технических условий (СТУ) по пожарной безопасности в связи с отсутствием крупномасштабных исследований и достаточности исходных данных для проведения расчетов. В некоторой степени методика вероятностного подхода по определению требуемых пределов огнестойкости, основанная на положениях[7], была освещена в [3, 4].

В международной практике проектирования при обеспечении пожарной безопасности объектов широкое распространение при определении требуемых пределов огнестойкости получил подход, разработанный Американским институтом нефти, регулирующий аспекты вопросов в области нефтяной и газовой промышленности[7]. Вероятностный подход также изложен в руководстве[8], изданном в развитии британского стандарта BS 7974 («Применение принципов пожарной безопасности при проектировании зданий. Свод практических правил»)[9], принципы которого аналогичны ГОСТ Р 12.3.047–2012[6], в связи с чем большого научно-практического интереса при проведении сравнительного анализа документ не представляет.

Целью настоящей статьи является проведение анализа основных положений нормативных документов по пожарной безопасности в части определения пределов огнестойкости в Российской Федерации и согласно требованиям, разработанным Американским институтом нефти. По результатам анализа предлагается рассмотреть часть апробированных международных требований по обеспечению огнестойкости строительных конструкций для включения в нормативные документы в области пожарной безопасности Российской Федерации.

Методология пассивной противопожарной защиты в Российской Федерации

В настоящее время концепция пассивной противопожарной защиты в российских нормативных документах по пожарной безопасности[1–5] основывается на детерминированных значениях. Требования к обеспечению пределов огнестойкости строительных конструкций сооружений нефтегазовых объектов (опорных конструкций аппаратов и емкостей, эстакад технологических трубопроводов, конструкций наружных установок, «юбок» колонных аппаратов и опор резервуаров), а также места и типы конструкций, подлежащие огнезащитной обработке, определены в сводах правил.

Согласно требованиям[1, 3, 4], колонны технологических трубопроводов с горючими и сжиженными горючими газами, легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, а также кабельные эстакады должны иметь пределы огнестойкости от R 45 до R 120 в зависимости от вида, обращающегося в технологическом процессе сырья и продукта и, соответственно, от используемых при проектировании нормативных документов. Следует отметить, что в СП 4.13130.2020[1] предел огнестойкости колонн эстакад технологических трубопроводов должен быть на высоту первого яруса, при этом в СП 240.1311500.2015[3] и СП 326.1311500.2017[4] предел огнестойкости должен определяться на всю высоту колонн технологических эстакад. На рис. 1 и 2 представлены примеры реализации требований сводов правил[1–3] по доведению строительных конструкций (металлических колон трубопроводных эстакад и металлических конструкций технологических этажерок) до требуемых пределов огнестойкости, в том числе в рамках проектной документации.

Необходимость соответствующих пределов огнестойкости регламентируется также для опорных конструкций технологических аппаратов и емкостей, содержащих легковоспламеняющиеся, горючие жидкости и сжиженные газы, конструкций (колонны, балки и ригели) наружных этажерок и «юбок» колонных аппаратов и опор резервуаров с легковоспламеняющимися жидкостями, хранящимися под давлением. Огнезащитной обработке подлежат как отдельно стоящее оборудование, так и аппараты, емкости и технологические колонны, входящие в комплекс технологических установок. Требуемые пределы огнестойкости указанных строительных конструкций регламентируются сводами правил[1–4], их значения по признаку несущей способности должны составлять от 45 до 120 мин. В СП 4.13130.2020[1] уточняется, что защиту конструкций наружных этажерок от воздействия высокой температуры следует предусматривать на высоту первого этажа (включая перекрытие первого этажа), но не менее 4 м от уровня земли.

Опорные конструкции резервуара для хранения СПГ должны иметь защиту от воздействия возможного пожара, обеспечивающую сохранение их функциональных свойств в течение времени полного выгорания расчетного объема, пролитого

[7] API 2218. Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants. 3rd ed. American Petroleum Institute, 2013.

[8] RD 7874-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. London, BSI, 2003.

[9] BS 7974:2019. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice. Current 31 Mar. 2019.

Рис. 1. Реализация огнезащитной обработки металлических конструкций в соответствии с требованиями сводов правил
Fig. 1. Implementation of fire-retardant treatment of metal structures in accordance with the requirements of the codes of practice

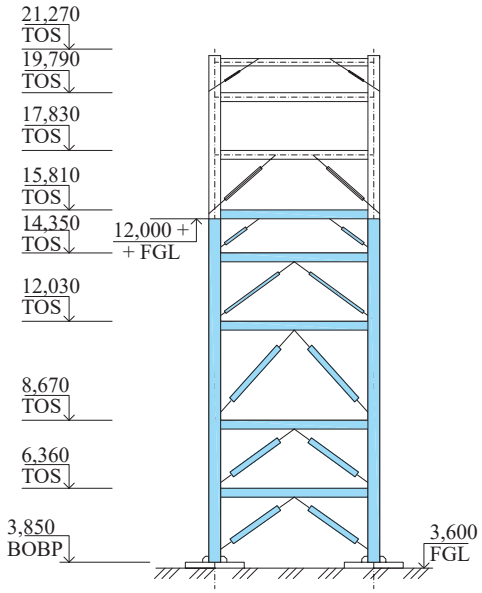


Рис. 2. Пример решения для проектной документации — огнезащитная обработка металлических конструкций в соответствии с требованиями сводов правил
Fig. 2. A case solution for the project documentation: the fire retardant treatment of metal structures in accordance with the requirements of the codes of practice

СПГ, но не менее предела огнестойкости R 120 согласно СП 240.1311500.2015[3] и R 150 в соответствии с СП 326.1311500.2017[4].

В ВУПП-88[5] для зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности приведены требования по обеспечению огнестойкости конструкций, аналогичные указанным выше, с учетом специфики рассматриваемых объектов в данном документе по пожарной безопасности.

Несмотря на достаточно развитый в Российской Федерации ТЭК и имеющиеся научные работы по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса [3, 5, 6], работы по обеспечению огнестойкости и изучению поведения строительных конструкций в условиях углеводородного пожара в России начались сравнительно недавно [3, 4, 6, 7–13], при этом необходимо отметить, что в российских нормативных документах до сих пор отсутствуют требования о необходимости соответствия пределов огнестойкости углеводородным режимам пожара, таким как пожары проливов и факельные горения (jet fire). Кроме этого, отсутствуют утвержденные методики испытаний огнезащитных материалов в условиях воздействия высокой температуры и быстрого роста этой температуры, обусловленного спецификой производств.

Методология пассивной противопожарной защиты согласно API 2218

API 2218[7] является комплексным документом по пассивной противопожарной защите нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов, который не ограничивается определением требований к огнестойкости строительных конструкций, а также содержит и общие требования к огнезащите, руководство по выбору, применению и эксплуатации систем огнезащитных покрытий. Документ распространяется как на проектирование новых, так и на расширение существующих объектов ТЭК, расположенных на материковой части, и регламентирует требования для объектов, на которых возможны пожары проливов жидких углеводородов, и не рассматривает защиту конструкций от факельных пожаров и взрывов парогазовоздушных смесей.

Необходимо отметить, что в API 2218[7] требования к огнестойкости изложены с учетом обязательного соответствия материалов показателям, полученным при проведении огневых натурных испытаний по углеводородной кривой согласно UL 1709[10] или функционально эквивалентных режимов и условий. Также при определении потребностей в огнезащите учитывается специфика производства и вещества, обращающиеся в технологическом процессе, и их количество (данные положения отсутствуют в российских нормативных документах по пожарной безопасности).

Определение требований к PFP для нефтеперерабатывающего или нефтехимического предприятия, изложенных в положениях API 2218[7], содержат оценку, основанную на опыте, или формальную оценку, основанную на анализе риска, включающую в себя разработку сценариев пожара, с учетом которых будет проводиться анализ потребностей в PFP. Один из методов выбора по определению необходимости в PFP приведен на рис. 3 и включает в себя следующие этапы:

1) оценка опасности, включая количественную оценку количества потенциального горючего;
2) разработка сценариев пожара, включая скорости потенциального выброса и определение размеров зон ожидаемого пожара;
3) определение необходимости в огнезащите, основанное на вероятности инцидента, с учетом опыта компании или отраслевого опыта, потенциального влияния ущерба для каждой зоны ожидаемого пожара и факторов технического, экономического, экологического, законодательного и человеческого рисков;
4) выбор уровня защиты (основанный на соответствующих стандартных методиках испытаний), который обеспечивался бы для указанного оборудования применением материала противопожарной обработки, основанного на анализе потребностей.

Первым этапом в определении необходимости и требований к пассивной противопожарной защите является идентификация потенциально опасного оборудования и его мест размещения. Количество, давление, температура вещества, состав потенциальных источников горючего (ЛВЖ, ГЖ и ГГ) — все эти факторы и параметры необходимо учитывать на первоначальном этапе в рамках процедуры анализа опасности. Процедура количественной и качественной оценки может выбираться владельцем объекта по своему усмотрению или проводиться в соответствии с требованиями, изложенными в таких документах, как OSHA 29 CFR 1910.119 «Управление безопасностью при переработке высоко опасных химических веществ»[11], EPA 40 CFR 68 «Программы управления риском»[12], API RP 750 «Управление рисками при нефтепереработке»[13] или Руководстве по процедурам оценки опасности CCPS [14].

Некоторые компании для упрощения определения уровня опасности используют подход по разделению оборудования на категории — вероятности возникновения пожара. Распределение оборудования по категориям вероятности возникновения пожара основано на статистических данных о частоте и/или тяжести последствий аналогичных аварий на объектах ТЭК со следующими группами технологического оборудования:

- высокая вероятность возникновения пожара — печи с огневыми подогревателями, насосы с производительностью выше 45 м^3/ч для перекачки ЛВЖ и ГЖ при температуре выше их температуры вспышки или в пределах 8 °С от температуры вспышки, компрессоры, сосуды, теплообменники и другое оборудование, содержащее легковоспламеняющиеся или горючие жидкости при температуре свыше 315 °С или при температуре самовоспламенения этих жидкостей (в зависимости от того, какая из этих двух температур будет меньше), установки каталитического крекинга, установки для гидрокрекинга, этиленовые установки, гидроочистители или крупные установки перегонки сырой нефти. Также некоторыми стандартами международных нефтегазовых компаний к категории высокой вероятности возникновения пожара может относиться технологическое оборудование (аппараты), содержащее достаточное количество ЛВЖ, ГЖ и/или ГГ, критерии объемов которых приведены ниже в табл. 1. Огнезащитная обработка требуется для оснований и опорных конструкций под технологическое оборудование;
- средняя вероятность возникновения пожара — сосуды и емкости, имеющие вероятность утечки, колонные аппараты, теплообменники, с воздушным охлаждением с обращением ЛВЖ и ГЖ, сложное периферийное оборудование с высокой степенью автоматизации;
- низкая вероятность возникновения пожара — насосы, которые качают жидкости класса IIIB при температуре ниже температуры вспышки, трубопроводы, находящиеся в составе обору-

[10] UL 1709. Standard for safety of rapid rise fire tests of protection materials for structural steel.

[11] Occupational Safety and Health Administration (OSHA) 29 CFR 1910.119. Process safety management of highly hazardous chemicals.

[12] EPA 40 CFR Part 68. Chemical accident prevention provisions.

[13] API RP 750, 1st Edition, January 1990. Management of Process Hazards.

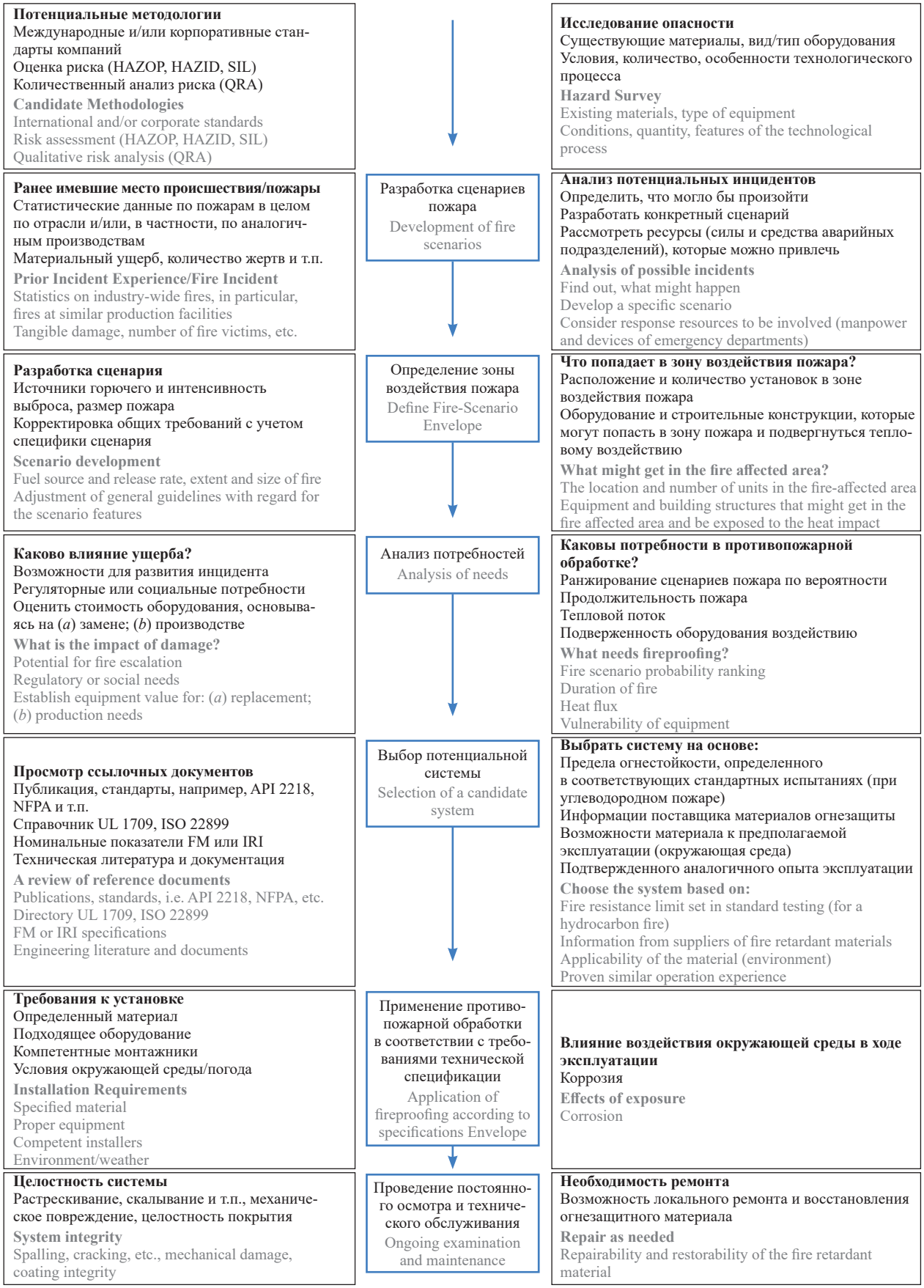


Рис. 3. Методология к определению пассивной противопожарной защиты

Fig. 3. Passive fire protection methodology

Таблица 1. Требования стандартов зарубежных компаний по объему углеводородов в технологических аппаратах для определения потребностей в огнезащите

Table 1. Requirements set by the standards of international companies in terms of the amount of hydrocarbons in the process equipment which is identified to find out fire protection needs

Нефтегазовая компания Oil & Gas Companies	Объем углеводородов Hydrocarbon amount
Shell	5 т / tons
Petronas	5 т / tons
Petroleo De Venezuela	5 т / tons
Total	5 м^3 / m^3
Chevron	3,8 м^3 / m^3

дования, имеющие концентрацию клапанов, фитингов и фланцев, теплообменники, которые могут приводить к утечкам из фланцев;

- нулевая вероятность возникновения пожара — оборудование, которое имеет низкую вероятность возникновения утечек ЛВЖ и ГЖ, и оборудование, в котором обращаются и/или транспортируются негорючие вещества и материалы, например, трубопроводы противопожарного водоснабжения. Вместе с тем отмечается, что, если трубопроводы противопожарного водоснабжения могут подвергаться воздействию пожара, то их также следует рассматривать при определении потребностей в защите от воздействия высоких температур.

Вторым шагом является разработка сценариев пожара, когда определяется возможная последовательность событий. Затем определяется, какие элементы и факторы будут влиять на процесс пожара, а именно:

- количество и скорость истечения ЛВЖ и ГЖ при проливе;
- давление и температура источника выброса;
- место расположения источника потенциального выброса ЛВЖ/ГЖ;
- возможные утечки и их размеры;
- будет ли розлив скапливаться в обваловании или будет поступать в дренажные системы;
- пропускная способность дренажных систем;
- физико-химические свойства веществ и материалов;
- другие факторы, которые могут влиять на процесс и время горения.

На основе сценариев пожара определяются возможные зоны воздействия пожара. Под зоной возможного воздействия пожара понимается трехмерное пространство, в пределах которого возможен пожар, в том числе пожар пролива ЛВЖ и ГЖ из оборудования с вероятностью возникновения пожара с достаточно длительным горением и интенсивностью для того, чтобы привести к существенному материальному ущербу.

Для пожаров углеводородов используются стандартные зоны возможного воздействия пожаров — от 6 до 12 м по горизонтали и вертикали от источника поступления ЛВЖ и/или ГЖ, а при пожарах проливов источником считаются площадки внутри периметра обвалования (отбортовки), в случае отсутствия обвалования зону воздействия пожара следует определять с учетом количества пролитой жидкости, топографии места пролива и других особенностей, влияющих на площадь розлива. Общие принципы определения зон воздействия пожара для оборудования некоторых групп и вероятности возникновения пожара представлены в виде алгоритма, который разработан авторами и приведен на рис. 4.

Обобщенные типичные зоны воздействия пожара, основанные на опыте проектирования нефтеперерабатывающих заводов, приведены в табл. 1 API 2218[7] и более поздней работе [4], посвященной в том числе требованиям API 2218[7]. Указанные источники используются как общее руководство и описывают размеры зоны ожидаемого пожара, при этом в каждом проекте зоны воздействия пожара определяются индивидуально, исходя из специфики проектируемого объекта.

Аналогичный подход по определению зон воздействия пожара был успешно реализован в Российской Федерации в рамках разработки специальных технических условий на проектирование и строительство в части обеспечения пожарной безопасности на таких проектах, как «Ямал СПГ» — Завод СПГ Южно-Тамбейского месторождения, «Арктик СПГ 2» — Завод СПГ и СГК Салмановского (Утреннее) месторождения и среднетоннажном СПГ-проекте «Криогаз-Высоцк», расположенном в порту Высоцк Ленинградской области.

На рис. 5, 6 приведены выполненные примеры решений для проектной документации в соответствии с подходом API 2218[7], т.е. доведение металлических конструкций до требуемых пределов огнестойкости предусмотрено в местах (в зоне воздействия пожара), определенных на основе вероятности возникновения пожара от технологического оборудования, при этом конструкции, подлежащие огнезащите, обрабатываются в 12-метровом радиусе в трехмерном пространстве, согласно алгоритму на рис. 4.

Пример с указанием зон воздействия пожара, определенных по результатам проведенной работы по выявлению необходимости в огнезащитной обработке, показан на рис. 7. Для технологического оборудования предусмотрены 6 и 12-метровые зоны

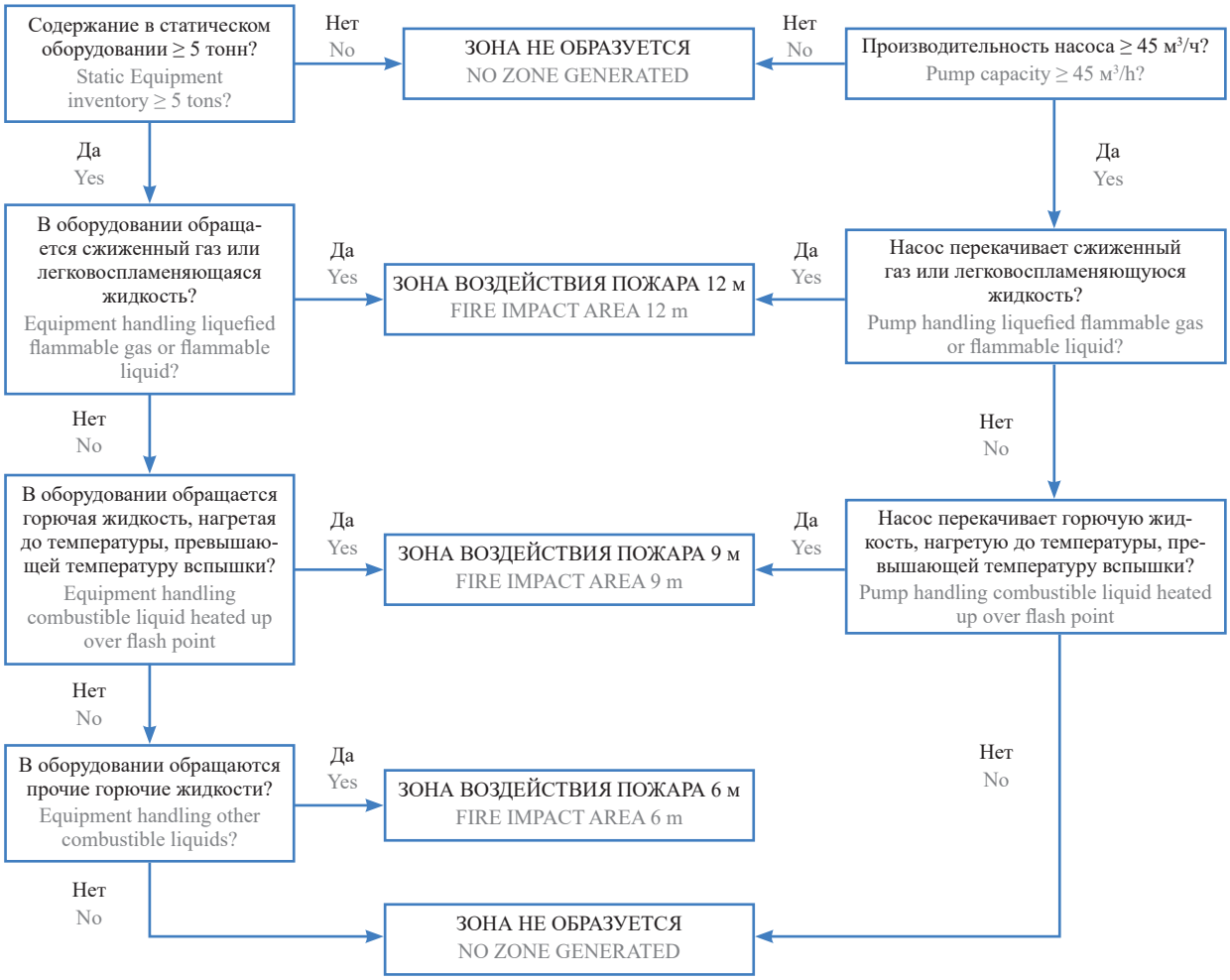


Рис. 4. Принципы определения зон воздействия пожара

Fig. 4. Principles of identification of fire impact areas

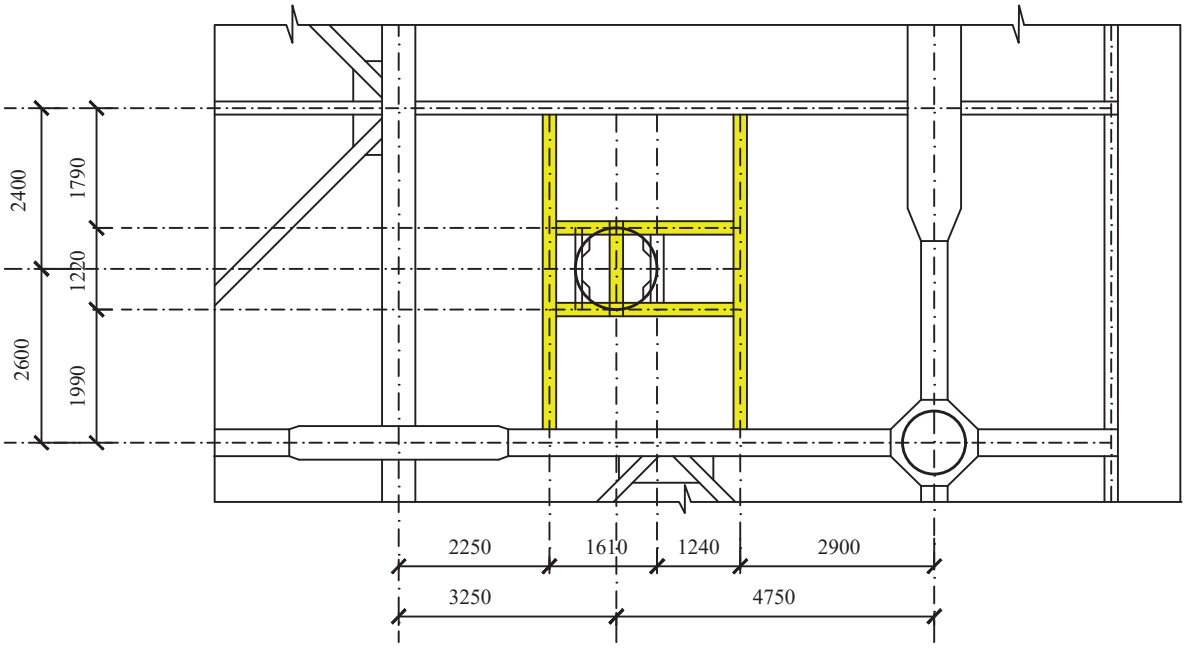
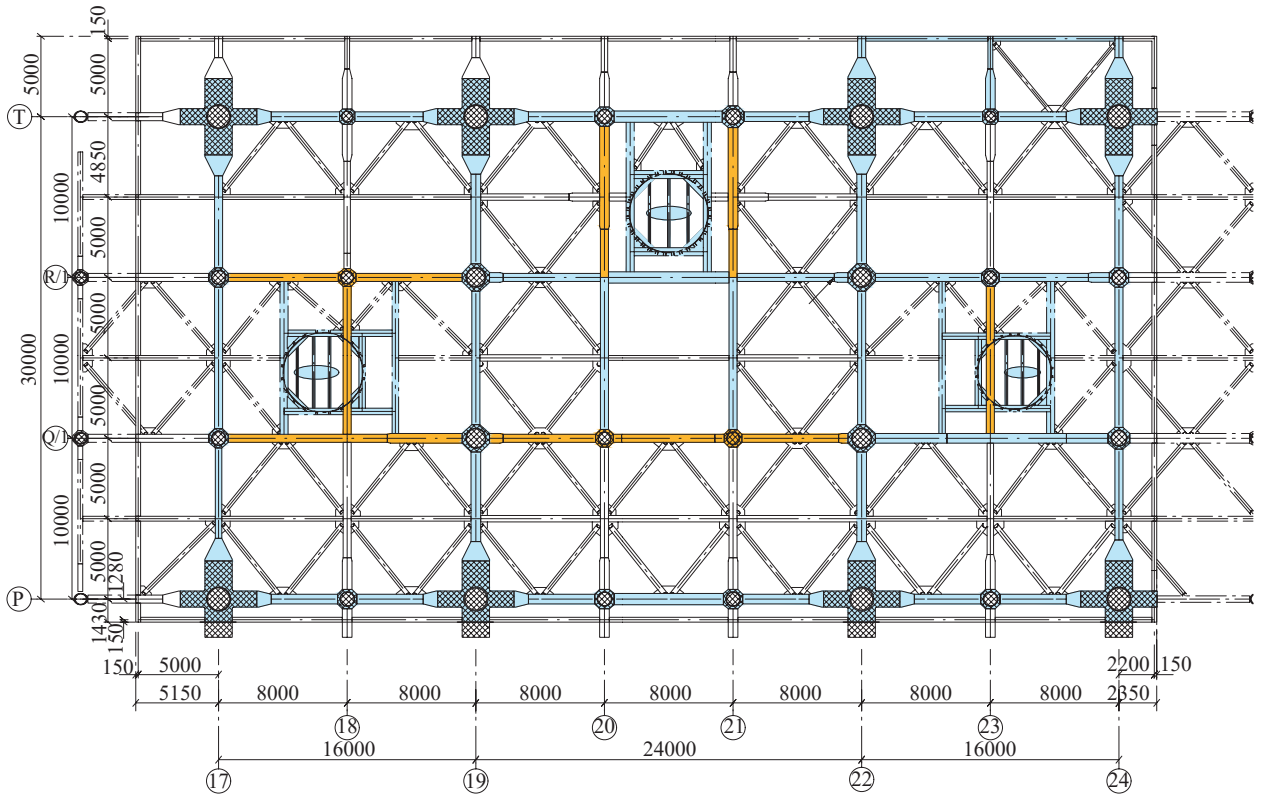


Рис. 5. Пример решения для конструкций, подлежащих огнезащите в зоне воздействия пожара

Fig. 5. A case solution for structures subject to fire protection in fire impact areas



	Степень защиты Protection level	Критическая температура, *T* Critical temperature, *T*	Температурный режим Temperature behaviour	Предел огнестойкости, мин Stability (minute)	Критическая температура, *T* Critical temperature, *T*	Криогенное воздействие Cryogenic exposure	Продолжительность, мин Duration, min
ОГЗ PFP Fire protection/ PFP(passive fire protection)	R 60	500 °C	HF	60	N/A	—	—
КрЗ CSP Cryogenic impact protection/CSP	C60/J20	500 °C	JF	20	–49 °C	CSP	60
КрЗ CSP Cryogenic impact protection/CSP	C60/J20/ R60	500 °C	HF/JF	60	–49 °C	CSP	60

Рис. 6. Конструкции, подлежащие огнезащите в зоне воздействия пожара (конструкции выделены оранжевым цветом) и защите от криогенного воздействия (конструкции выделены голубым цветом)

Fig. 6. Building structures subject to fire protection in the fire impact areas (structures are highlighted in orange) and protection from cryogenic impacts (structures are highlighted in blue)

воздействия пожара с учетом вида и объема легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

Следующим этапом является анализ необходимости применения PFP, в рамках которого определяется уровень защиты (требуемые пределы огнестойкости) строительных конструкций и оборудования, если огнезащита вообще требуется. Анализ начинается с изучения факторов, касающихся размеров последствий и продолжительности воздействия пожара. Затем учитывают, какое оборудование мо-

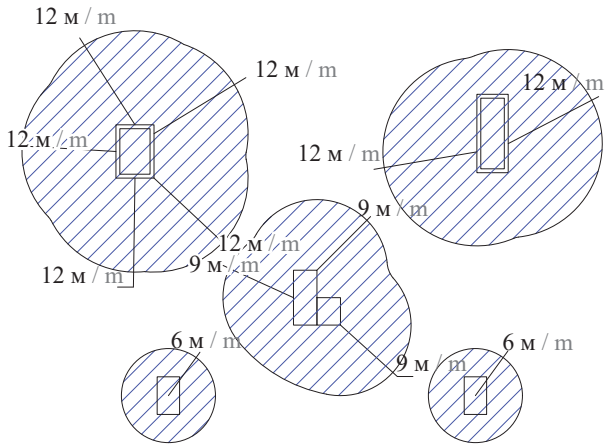


Рис. 7. Определенные зоны воздействия пожара
Fig. 7. Fire impact areas

жет подвергаться воздействию пожара и в какой степени, защищенность (уязвимость) оборудования от теплового воздействия, возможность влияния (вмешательства) факторов пожара на технологический процесс и последствия ожидаемого пожара. Последний шаг включает социальное воздействие, воздействие на окружающую среду и человека, а также стоимость оборудования. При анализе необходимости применения огнезащиты рассматривается вероятность событий, связанных с авариями, в том числе с пожарами.

Результат анализа должен включать в себя определение того, какое оборудование должно быть защищено от воздействия высоких температур, информацию о интенсивности воздействия пожара и продолжительности такого воздействия. Также при анализе необходимости в PFP учитываются системы активной противопожарной защиты (системы водяного орошения, пожаротушения) и их влияние на строительные конструкции.

Заключительный этап включает в себя определение пределов огнестойкости строительных конструкций в зависимости от типа пожара и интенсивности теплового воздействия в пределах зон воздействия пожара. Кроме этого, при определении пределов огнестойкости учитывается следующее:

- время, требуемое для того, чтобы перекрыть возможные утечки посредством системы противоаварийной защиты (запарная арматура и/или аварийные задвижки);
- наличие и требуемые расходы воды, подаваемой в течение нормативного времени;
- время, требуемое для организации достаточного и надежного охлаждения за счет стационарных систем охлаждения;
- время реагирования и состав сил и средств объектовых и/или других подразделений пожарной охраны;
- пропускная способность дренажной системы.

В положениях API 2218[7] приводятся требования к системам покрытий, используемых для огнезащиты, к типам строительных конструкций и оборудования, подлежащих защите в зоне воздействия пожара, характеристикам и типам огнезащитных материалов, требования к испытаниям, контролю качества и наблюдениям при эксплуатации.

Обсуждение и результаты

Основные сравниваемые показатели по результатам проведенного анализа требований в части огнестойкости строительных конструкций и огнезащитных материалов, изложенных в российских и зарубежных нормативных документах, отражены в табл. 2.

Из сравниваемых параметров видно, что требования и подходы к пассивной противопожарной защите для объектов защиты нефтегазового комплекса, изложенные в российских документах по пожарной безопасности и в рассматриваемом в данной статье документе API 2218[7], кардинально различаются. Зарубежные документы содержат более строгие требования при проведении сертификационных испытаний огнезащитных материалов, номенклатура испытаний содержит широкий спектр видов оценки на соответствие требованиям, которые позволяют значительно шире оценить качество материалов пассивной противопожарной защиты, в том числе с учетом их среды и возможных условий эксплуатации.

Особый интерес представляет методика, основанная на возможности определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций сооружений объектов ТЭК на рациональном сопоставлении вероятности возникновения, характере пожара (опасных факторов пожара), его последствий и ожидаемого материального ущерба. Работы по определению требуемых пределов огнестойкости могут быть проведены в рамках количественной оценки рисков (оценке пожарных рисков). Использование предлагаемой методики расчетов требуемых пределов огнестойкости согласно API 2218[7] на протяжении всех стадий (разработка, проектирование, строительство, эксплуатация) жизненного цикла объектов позволит подойти с экономической эффективностью затрат на обеспечение противопожарной защиты и обеспечить требуемые пределы огнестойкости конструкций сооружений (этажерок, площадок под технологическое оборудование) на основании расчетов и с учетом вероятности возникновения пожара в местах, где это действительно необходимо, исходя из специфики технологического процесса.

Таблица 2. Основные показатели сравнения API 22187 и российских нормативных документов
Table 2. Main indicators of comparison of API 2218 and Russian regulations

Показатель Criteria	Нормативный документ Regulatory document		
	API 2218	Российские нормативные документы по пожарной безопасности Russian fire safety norms	Примечание Notes
Утвержденная методика проведения испытаний в условиях углеводородного пожара Approved testing methodology for hydrocarbon fire conditions	+	+/–*	*В нормативных документах РФ по пожарной безопасности отсутствуют методики испытания огнезащитных материалов и строительных конструкций в условиях углеводородных режимов пожара. Существующий ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014[14] добровольного применения содержит только требования к режимам пожара (в том числе к углеводородному) *In the RF regulatory documents on fire safety, there are no methods for testing fire-retardant materials and building structures in conditions of hydrocarbon fire modes. There is GOST R EN 1363-2-2014 of voluntary application, that only has requirements for fire modes, including a hydrocarbon fire
Требования о необходимости испытаний огнезащитных материалов в условиях углеводородного пожара — пожар пролива Requirements for the need to test fireproofing materials exposed to a hydrocarbon fire, a pool fire	+	+/–*	*В сводах правил отсутствуют обязательные требования о необходимости соответствия пределов огнестойкости строительных конструкций в условиях углеводородного пожара. В соответствии с требованием п. 5.2.1. СП 2.13130.2020: «Пределы огнестойкости строительных конструкций по альтернативным температурным режимам определяются в специально оговоренных случаях, установленных нормативными документами по пожарной безопасности», при этом требования к показателям огнестойкости конструкций и методики проведения испытаний не разработаны *Codes of practice do not contain mandatory requirements for the need to ensure compliance with the fire resistance limits of building structures exposed to a hydrocarbon fire. Pursuant to 5.2.1. SP 2.13130.2020 “The limits of fire resistance of building structures in terms of alternative temperature modes are determined in stipulated cases established by regulatory documents on fire safety”, while no requirements for the values of fire resistance of structures and test methods are available

[14] ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2014 г. № 1275-ст.

Продолжение Табл. 2 / Continuation of the Table 2

Показатель Criteria	Нормативный документ Regulatory document		
	API 2218	Российские нормативные документы по пожарной безопасности Russian fire safety norms	Примечание Notes
Требования о необходимости испытаний огнезащитных материалов в условиях углеводородного пожара — струйный пожар Requirements for the need to test fireproofing materials exposed to a hydrocarbon fire, a jet fire	+	–	–
Требуемый тепловой поток при проведении огневых испытаний пассивной противопожарной защиты для пожаров проливов углеводородов — 205 кВт/м^2 The appropriate heat flux during PFP fire tests for pool hydrocarbon fires — 205 kW/m^2	+	–	–
Требуемый тепловой поток при проведении огневых испытаний огнезащитных материалов для факельных пожаров углеводородов — 320 кВт/м^2 The appropriate heat flux during fire PFP tests for jet hydrocarbon fires — 320 kW/m^2	+	–	–
Методика проведения испытаний огнезащитных материалов на устойчивость к криогенным воздействиям Methods of PFP testing for resistance to cryogenic effects	+	–	–

Продолжение Табл. 2 / Continuation of the Table 2

Показатель Criteria	Нормативный документ Regulatory document		
	API 2218	Российские нормативные документы по пожарной безопасности Russian fire safety norms	Примечание Notes
Требования о необходимости устойчивости материалов огнезащиты к взрывным нагрузкам Requirements for PFP exposed to explosive loads	+	+/–*	*Требования к взрывозащите огнезащитных материалов в сводах правил по пожарной безопасности отсутствуют. При этом требования к взрывозащите приведены в п. 4.20 СП 433.1325800.2019[15]: «Огнезащиту стальных несущих конструкций в зданиях категорий А и Б следует выполнять средствами огнезащиты, обладающими достаточной взрывоустойчивостью. Не допускается применять плитные, минераловатные и другие средства огнезащиты, которые могут разрушиться при возможном взрыве», но необходимо отметить, что данный свод правил является документом, регламентирующим работы, связанные с монтажом огнезащиты, а не проектированием. Также не указаны показатели взрывозащиты, не приведены методики испытаний и т.п. *There are no explosion safety requirements for fire-retardant materials in fire safety codes. At the same time, explosion safety requirements are provided Clause 4.20 of SP 433.1325800.2019 “The fire safety of load-bearing steel structures in category A and B buildings should be carried out using fire safety means that have sufficient explosion resistance. It is not allowed to use slabs, mineral wool and other means of fire protection, which can be destroyed in a potential explosion», but it should be noted that this set of rules applies to the work related to the installation of fire safety means, rather than their design. Also, explosion safety indicators are not specified, test methods are not provided, etc.
Методика испытаний материалов PFP на устойчивость при взрыве A methodology of PFP testing for explosion resistance	+	–	–
Требования о необходимости стойкости огнезащитных материалов к воздействию криогенных жидкостей Requirements for fire retardant materials to be resistant to effects of cryogenic liquids	+	–	–

[15] Огнезащита стальных конструкций. Правила производства работ : (СП 433.1325800.2019) : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 января 2019 г. № 38/пр и введен в действие с 25 июля 2019 г.

Продолжение Табл. 2 / Continuation of the Table 2

Показатель Criteria	Нормативный документ Regulatory document		
	API 2218	Российские нормативные документы по пожарной безопасности Russian fire safety norms	Примечание Notes
Вероятностный подход к определению требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций и определению конструкций, которые подлежат огнезащитной обработке Probabilistic approach to determining the required limits of fire resistance of building structures and determining structures that are subject to fire retardant treatment	+	+/–*	*В ГОСТ Р 12.3.047–2012[6] приведена методика расчета требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, согласно которой требуемые пределы огнестойкости устанавливаются на основе определения эквивалентной продолжительности пожаров и коэффициента огнестойкости. Широкое практическое применение затрудняется отсутствием необходимых исходных данных — параметров распределения предела огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожара как случайных величин. Также в указанном ГОСТе не рассматриваются случаи воздействия на строительные конструкции факельного горения. Необходимость использования указанной методики не закреплена в сводах правил с указанием возможности обоснования требуемых (расчетных) пределов огнестойкости для строительных конструкций. Использование методики возможно при разработке СТУ по пожарной безопасности на объект защиты *GOST R 12.3.047-2012 provides a methodology for calculating the required fire resistance limits of a building structure, according to which the pre-set fire resistance limits are established on the basis of the equivalent duration of fires and the fire resistance coefficient. The wide practical application is hampered by the lack of the necessary initial data, including parameters of distribution of the fire resistance limit and the equivalent duration of the fire as random variables. Also, GOST does not consider cases of impact produced on building structures by jet fires The need to use this methodology is not specified in the codes of practice specifying the possibility of justifying the required (calculated) fire resistance limits for building structures. The use of the methodology is possible only when developing fire safety regulations for a construction facility
Детерминированный подход к определению требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций и определению конструкций, которые подлежат огнезащитной обработке A deterministic approach to determining the required limits of fire resistance of building structures and structures that are subject to fire retardant treatment	–	+	—

Окончание Табл. 2 / End of the Table 2

Показатель Criteria	Нормативный документ Regulatory document		
	API 2218	Российские нормативные документы по пожарной безопасности Russian fire safety norms	Примечание Notes
Требуемые пределы огнестойкости конструкций *R*, мин Required limits of fire resistance of structures *R*, in min	0…120	45…120*	*Более высокие требования предъявляются разработчиками СТУ по пожарной безопасности с учетом положений API 2218[7] *Tighter requirements are imposed by developers of fire safety regulations taking into account the provisions of API 2218
Требования к обеспечению огнестойкости опор оснований технологических аппаратов в зависимости от объема содержания ЛВЖ, ГЖ и ГГ Requirements for the fire resistance of supports of bases of technological devices, depending on the amount of flammable liquids, combustible liquids and combustible gases	+*	–	*В зависимости от объема содержания ЛВЖ, ГЖ и ГГ в технологических аппаратах — регламентируются рядом требований, указанных в стандартах нефтяных компаний *Depending on the amount of flammable liquids, combustible liquids and combustible gases in technological devices, it is regulated by a number of requirements specified in Standards of oil companies
Возможные зоны воздействия (ожидаемого) пожара, в которых требуется пассивная противопожарная защита Potential (anticipated) fire impact areas that need passive fire protection	+	–	—
Обязательные климатические испытания (циклы заморозки-разморозки, солевой туман, тест на старение, погружение в морскую среду) перед огневыми сертификационными испытаниями Mandatory climate tests (freeze-thaw cycles, salt fog, aging test, immersion in the marine environment) before fire certification tests	+	–	—

Выводы

Рассмотрены современные принципы и требования к огнестойкости объектов нефтегазового комплекса, изложенные в американском нормативном документе API 2218[7] и в российских нормативных документах по пожарной безопасности. Установлено, что подходы к определению требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций (конструкций этажерок и эстакад) предприятий нефтегазового комплекса существенно отличаются. В российских документах принят детерминированный подход, при этом в зарубежных источниках приведен достаточно прогрессивный риск-ориентированный принцип обеспечения огнестойкости строительных конструкций, при котором задаются интервалы значений и определяются места защиты, основываясь на вероятностном подходе в зависимо-

сти от специфики, состава и наличия технологического оборудования.

Интегрирование в российские нормативные документы по пожарной безопасности основных требований, содержащихся в API 2218[7], и требований зарубежных документов, таких как UL 1709[10], ISO 22899-1[16] и Norsok M-501[17] в части необходимых испытаний огнезащитных материалов, позволит более гибко подойти к принципам огнестойкости (определению требуемых пределов огнестойкости и конструкций, которые подлежат огнезащите) и обеспечить эффективность применяемых огнезащитных материалов к условиям эксплуатации объекта защиты.

[16] ISO 22899-1:2021. Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection materials — Part 1: General requirements.

[17] Norsok M-501. Surface preparation and protective coating (Edition 6, February 2012).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Присадков В.И.* Надежность строительных конструкций при пожаре // Огнестойкость строительных конструкций : сб. тр. М. : ВНИИПО, 1986. С. 70–73.
2. *Присадков В.И.* Разработка методов выбора рациональных систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. … д-ра техн. наук. М., 1990. 290 с.
3. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н.* Методы определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 22. № 11. С. 51–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57
4. *Шебеко А.Ю.* Оценка требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций этажерок и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли // Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 103–107.
5. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю.* Условия пожарной безопасности при определении допустимых параметров функционирования производственных объектов // Пожарная безопасность. 2009. № 4. С. 61–66.
6. *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М.* Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для стальных конструкций технологической эстакады нефтеперерабатывающего предприятия // Пожарная безопасность. 2017. № 1. С. 25–29.
7. *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, 19 сентября 2018 г. Часть II. Иваново, 2018. С. 233–239. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307945&pff=1
8. *Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В.* Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 3. С. 49–57. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639720
9. *Дринберг А.С., Гравит М.В., Зыбина О.А.* Огнезащита конструкций интумесцентными лакокрасочными материалами при углеводородном режиме пожара // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 1, 2. С. 44–49.
10. *Gravit M., Golub E., Klementev B., Dmitriev I.* Fire protective glass fiber reinforced concrete plates for steel structures under different types of fire exposure // Buildings. 2021. No. 11. P. 187. DOI: 10.3390/buildings11050187
11. *Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V.* Increase of fire resistance limits of building structures of oil-and-gas complex under hydrocarbon fire // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Springer, 2018. Vol. 692. Pp. 818–829. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_87
12. *Gravit M., Zimin S., Lazarev Y., Dmitriev I., Golub E.* Fire simulation of bearing structures for natural gas module plant // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds). Springer, Cham., 2020. Vol. 1116. Pp. 365–376. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_36

13. *Gravit M.V., Golub E.V., Antonov S.P.* Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 3. Pp. 86–94. DOI: 10.18720/MCE.79.9
14. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. 2nd. ed. AIChE/CCPS, 2000. 744 p.

REFERENCES

1. Prisadkov V.I. A realibility of building structures at a fire. *Fire resistances of building structures*. Moscow, VNIIPO Publ., 1986; 70-73. (rus).
2. Prisadkov V.I. *A creation of methods for a choice of an optimal fire protection system for industrial buildings : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, 1990; 290. (rus).
3. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Giletich A.N. About the fire safety conditions to determine the admissible parameters of industrial premises functioning. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 4:61-66. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57 (rus).
4. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. Estimation of required fire resistance limits of bearing structures of refinery platforms and pipe racks. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2017; 1:25-29. (rus).
5. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Giletich A.N. About the fire safety conditions to determine the admissible parameters of industrial premises functioning. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2018; 22(11):51-57. (rus).
6. Shebeko A.Yu. A Settlement assessment of equivalent fire duration for steel structures of pipe rack of a refinery. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2019; 1:103-107. (rus).
7. Klementev B.A., Oleynikov S.N. The basic directions of development of standardization: ensuring the fire safety of liquefied natural gas. *Modern fire-safe materials and technologies : Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Safety Culture. Ivanovo, September 19, 2018. Part II.* Ivanovo, 2018; 233-239. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307945&pff=1
8. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):49-57. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639720
9. Drinberg A.S., Gravit M.V., Zybina O.A. Fire protection with intumescent coatings under the hydrocarbon fire conditions. *Lakokrasochnie materialy i ikh primenenie/Russian Coatings Journal*. 2018; 1-2:44-49.
10. Gravit M., Golub E., Klementev B., Dmitriev I. Fire protective glass fiber reinforced concrete plates for steel structures under different types of fire exposure. *Buildings*. 2021; 11:187. DOI: 10.3390/buildings11050187
11. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil-and-gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. Springer, 2018; 692:818-829. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_87
12. Gravit M., Zimin S., Lazarev Y., Dmitriev I., Golub E. Fire simulation of bearing structures for natural gas module plant. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds). Springer, Cham., 2020; 1116: 365-376. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_36
13. Gravit M.V., Golub E.V., Antonov S.P. Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 3:86-94. DOI: 10.18720/MCE.79.9
14. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. 2nd. ed. AIChE/CCPS, 2000; 744.

Поступала 23.06.2021, после доработки 26.08.2021;
принята к публикации 02.09.2021
Received June 23, 2021; Received in revised form August 26, 2021;
Accepted September 2, 2021

Информация об авторах

КЛЕМЕНТЬЕВ Борис Александрович, эксперт управления экспертиз и согласований с надзорными органами, Арктик СПГ 2, Россия, 629309, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Новый Уренгой, мкр. Славянский, 9/117; Researcher ID: AAW-6294-2021; Scopus Author ID: 57223335836; ORCID: 0000-0003-3790-7098; e-mail: boris.klementev@arcticspg.ru

КАЛАЧ Андрей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1-а; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; Author ID: 667288; Researcher ID: B-4397-2014; Scopus Author ID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: gravit_mv@spbstu.ru

Information about the authors

Boris A. KLEMENTEV, Expert of the Group of Technical Approvals and Expertise, Arctic LNG 2, Building Estate Slavyanskiy, 9/117, Novy Urengoy, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, 629309, Russian Federation; Researcher ID: AAW-6294-2021; Scopus Author ID: 57223335836; ORCID: 0000-0003-3790-7098; e-mail: boris.klementev@arcticspg.ru

Andrey V. KALACH, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1-a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federatio; Author ID: 667288; Researcher ID: B-4397-2014; Scopus Author ID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: gravit_mv@spbstu.ru

Вклад авторов:

Клементьев Б.А. — концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.
Калач А.В. — научное руководство; доработка текста.
Гравит М.В. — компоновка результатов; корректировка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Klementyev B.A. — research concept; development of methodology; writing the source text; final conclusions.
Kalach A.V. — scientific leadership; revision of the text.
Gravit M.V. — arrangement of results; correction of the text.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 23–29
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):23-29

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 536.46
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29

Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера

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, Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. К одной из причин завышения взрывоопасности пыли в камере объемом (20 ± 2) л относится повышенная начальная температура аэровзвеси. Существенный вклад в увеличение начальной температуры вносит процедура наполнения предварительно откаченной камеры воздухом из ресивера, которая используется для распределения пыли по объему камеры. В данной работе увеличение температуры воздуха в 18,7-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера определено на основе экспериментального исследования.
Методика эксперимента. Измерение температуры воздуха в камере при добавлении воздуха из ресивера осуществляли с помощью термоэлектрического преобразователя ВР 5/20 (термопары). Спай термопары располагался на расстоянии 70 мм от внутренней стенки камеры. Сигнал термопары обрабатывался программируемым логическим контроллером MCLab PRO (разрешение по времени — 1 мс).
Результаты исследования. Средства измерения зафиксировали повышение температуры спая термопары на +14 град. Из-за сопоставимости инерционности термопары (3 с) и характерного времени охлаждения воздуха стенками камеры (5 с) результаты измерений занижали реальное значение скачка температуры воздуха в камере. Уточнение результатов измерения сделали на основе простой модели процессов теплообмена участвующих объектов (спай термопары – воздух – стенка камеры) с экспоненциальной релаксацией разницы температур со временем. В результате оценили реальное увеличение начальной температуры в камере величиной +30 град.
Обсуждение результатов. Полученная оценка скачка температуры на +30 град. вносит заметный вклад в общее увеличение начальной температуры, которое ранее ассоциировалось только с выгоранием источника зажигания (+80 град.).
Выводы. С учетом известного увеличения температуры в камере, вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж), реальное значение начальной температуры среды при исследовании пыли в камере объемом (20 ± 2) л может достигать 135 °С.

Ключевые слова: взрыв; пыль; тестирование; начальная температура; автонагрев

Благодарность. Автор выражает искреннюю благодарность Девликанову М.О. за техническую помощь при проведении эксперимента на установке ПВ-20.

Для цитирования: *Полетаев Н.Л.* Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 23–29. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29

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

A change in the air temperature inside a 20-liter chamber when air is added from the receiver

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. One of the reasons for the overestimation of the explosion hazard of dust inside a (20 ± 2)-liter chamber is the elevated initial temperature of the air suspension. The initial temperature is also raised by the process of filling the pre-emptied chamber with air from the receiver, used to distribute dust over the chamber. In this work, an increase in the air temperature inside an 18.7-liter chamber was identified in an experiment for the case of addition of air from the receiver.
The methodology of an experiment. The air temperature in the chamber was measured at the time when the air from the receiver was added using a WR 5/20 thermoelectric converter (a thermocouple). The thermocouple junction was located at the distance of 70 mm from the inner wall of the chamber. The thermocouple signal was processed by an MCLab PRO programmable logic controller (the time resolution is 1 ms).
Research results. The measuring instruments recorded an increase in the temperature of the thermocouple junction by +14 degrees. Due to the comparability of the inertia of the thermocouple (3 s) and the characteristic time of air

© Н.Л. Полетаев, 2021

cooling by the chamber walls (5 s), the measurement results underestimated the real value of a jump in the air temperature inside the chamber. Measurement results were refined using a simple model of heat transfer between the objects involved in the process (thermocouple junction – air – chamber wall) that entailed the exponential relaxation of the temperature difference over time. As a result, an estimated increase in the initial temperature inside the chamber of +30 degrees was identified.

Results and discussion. The temperature jump by +30 degrees makes a noticeable contribution to the total jump in the initial temperature, which was previously tied solely to the burnout of the ignition source (+80 degrees).

Conclusions. Given the known increase in the temperature inside the chamber caused by the burnout of a standard ignition source (2 kJ), the real value of the initial temperature of the environment can reach 135 °C in the course of studying dust in a (20 ± 2)-liter chamber.

Keywords: explosion; dust; testing; initial temperature; self-heating

Acknowledgment. The author expresses his sincere gratitude to Devlikanov M.O. for the technical assistance during the experiment conducted using the 20-liter chamber.

For citation: Poletaev N.L. A change in the air temperature inside a 20-liter chamber when air is added from the receiver. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):23-29. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29 (rus).

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

1. Введение

Из научных работ [1] и стандартов[1] известно, что тестирование взрывоопасности пыли общепризнанными стандартными методами[2–5] в сферической 20-литровой камере может приводить к оценке, существенно отличающейся от результата тестирования пыли в крупномасштабной камере объемом 1 м^3, который принято считать наиболее надежным. Существенному отличию оценок тестирования взрывоопасности пыли в разномасштабных камерах может способствовать целый ряд особенностей методик эксперимента. В частности, к ним относятся различие полей распределения турбулентности газовой фазы аэровзвеси по объему камеры [2, 3], измельчение пыли при диспергировании [4], различие интенсивности седиментации пыли при высокой концентрации взвеси [5] и др. Наибольшее отличие результатов тестирования наблюдается для пылей с низким уровнем взрывоопасности, которым в последнее десятилетие стали уделять повышенное внимание [6–9].

С примерами принципиального различия результатов тестирования связаны пыли ряда твердых горючих материалов, которые не взрываются в камере объемом 1 м^3, но взрываются в 20-литровой камере с энергоемким пиротехническим источником зажигания [10–13]. Это явление, известное с конца 1980-х годов, получило название overdrive [6, 11]. Согласно предположению, высказанному в [11], overdrive обусловлен тем, что реальная начальная температура пыли в 20-литровой камере выше нормального значения (T_0 = 298 К или 25 °С), заявленного в методе испытаний. Исследование настоящей работы относится к уточнению упомянутого изменения начальной температуры аэровзвеси.

Общее увеличение начальной температуры среды в 20-литровой камере можно представить в виде суммы трех последовательных скачков температуры, обусловленных соответственно тремя последовательными процессами подготовки аэровзвеси к стандартным огневым испытаниям [6]:

1) наполнением предварительно откаченной камеры воздухом из ресивера до нормального уровня давления, равного примерно 100 кПа [6]; в стандартных испытаниях поток воздуха из ресивера распыляет расположенный на его пути образец исследуемой пыли в объеме камеры;

2) адиабатическим сжатием газовой фазы в камере при локальном горении источника зажигания [6, 11];

3) конвективным нагревом среды во всей камере продуктами горения источника зажигания [12].

Второй скачок температуры описывается расчетным соотношением из [6]. Сумма второго и третьего скачков температуры оценивается расчетным соотношением из [9]. В общем случае сумма второго и третьего скачков температуры пропорциональна энергии источника зажигания и, например, для стандартного пиротехнического источника зажигания с запасом химической энергии 2 кДж составляет около 80 град. До настоящего времени именно эту величину брали за основу при оценке увеличения начальной температуры среды в 20-литровой камере, пренебрегая первым скачком температуры в камере, согласно стандарту ASTM E1226-19[5] и работе [14].

[1] NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2013.

[2] ASTM E1515–14. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts, 2014.

[3] EN 14034-3:2006+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds, 2011.

[4] ASTM E1226 - 2012a. Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds, 2012. DOI:10.1520/E1226-12A.

[5] ASTM E1226-19. Standard Method Explosibility Dust Clouds. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019:1-15.

Расчетная оценка первого скачка температуры затруднена из-за отсутствия точных сведений о теплообмене между воздушным потоком из ресивера в камеру и ее конструктивными элементами. Используя крайние случаи теплообмена (адиабатическое и изотермическое истечение), автор [6] определил границы значений первого скачка температуры среды — от 11 до 51 град. Эти границы показывают возможность заметного вклада первого скачка температуры в общее увеличение начальной температуры исследуемой аэровзвеси. Ввиду важности знания начальной температуры среды в 20-литровой камере следует уточнить значение первого скачка температуры, что с учетом вышесказанного целесообразно сделать экспериментально. Автору не известны опубликованные работы, в которых экспериментально исследовался первый скачок температуры. Более того, устные ответы специалистов на вопрос о знаке величины первого скачка температуры могли сопровождаться утверждением о том, что предварительно сжатый воздух, поступающий в камеру из ресивера, снижает температуру в камере. Это обстоятельство дополнительно подчеркивает актуальность указанного исследования.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию увеличения температуры воздуха в стандартной квазисферической камере ВНИИПО МЧС России объемом около 20 л при добавлении воздуха из ресивера.

2. Методика эксперимента

2.1. Использованные приборы и инструменты

В настоящих экспериментальных исследованиях использовалась установка ПВ-20, разработанная ВНИИПО МЧС России и предназначенная для исследования показателей взрыва аэровзвесей в квазисферической камере объемом 18,7 л. Схема и параметры установки описаны в [6]. Управление работой установки, а также регистрация показаний датчиков давления, установленных на камере и ресивере, осуществляются программируемым логическим контроллером «Микролаб» (далее — контроллером[6]). Результаты измерений контроллером выводились на видеомонитор компьютера и сохранялись в памяти компьютера.

Для исследования температуры воздуха внутри камеры в ее объем вводился датчик температуры. Ввод осуществлялся через технологическое отверстие в боковой поверхности камеры, расположенное на уровне, отвечающем половине высоты (0,34 м) внутреннего объема камеры. Датчик представлял собой термоэлектрический преобразователь ВР 5/20 (далее — ТП) с электродами из сплавов вольфрама и рения. Диаметр электродов — 0,1 мм; поперечный размер спая электродов около — 0,3 мм. Расстояние от внутренней боковой поверхности камеры до спая — примерно 70 мм. Выход электродов наружу через упомянутое технологическое отверстие герметизировался.

Свободные концы электродов ТП подключали ко второму контроллеру, с дисплея которого видеокамерой считывались результаты измерения температуры спая ТП. Анализ видеосъемки позволял строить зависимость температуры спая ТП от времени для каждого из проведенных экспериментов с разрешением по времени примерно 0,1 с.

С целью корректного использования результатов измерений температуры спая ТП для оценки изменяющейся во времени температуры окружающего спай воздуха измеряли инерционность ТП в соответствии с ГОСТ 6616–94[7]. Согласно данному стандарту, показатель тепловой инерции ТП (далее — инерция ТП) — это время τ_{tc}, необходимое для того, чтобы при внесении ТП в среду с постоянной температурой разность температур среды и спая ТП уменьшилась в 2,71 раза. В качестве среды с постоянной (на короткое время измерения) температурой использовался нагретый электроспиралью воздух в перевернутом (во избежание конвективного охлаждения) термосе с открытой горловиной. В результате указанных измерений определили $\tau_{tc} \approx 3$ с, что находится в приемлемом согласии с данными [15].

2.2. Методика проведения опыта

Из камеры установки ПВ-20 в течение 40 с вакуум-насосом откачивается воздух до давления около 50 кПа (здесь и далее приводятся абсолютные значения давления воздуха). В ресивер установки объемом 0,76 л насосом закачивается воздух до давления около 1100 кПа. В течение 10 с корректируется положение видеокамеры, снимающей показания температуры с дисплея второго контроллера, производится включение видеокамеры.

С клавиатуры компьютера через первый контроллер направляют команду на открытие электропневмоклапана, установленного на трубопроводе, соединяющем ресивер и камеру. Воздух из ресивера поступает в камеру в течение промежутка времени $\tau_r \approx 0{,}2$ с, после чего электропневмоклапан закрывается. Начальные давления воздуха в ресивере и камере подбираются таким образом, чтобы к моменту закрытия электропневмоклапана давление в камере оказывалось близким к нормальному значению (примерно 100 кПа).

[6] MCLab PRO. URL: mclab.ru›izmeritelnye-pribory/microlab-pro

[7] ГОСТ 6616–94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации 21 октября 1994 г.

Через 10 с прерывается съемка видеокамерой, а результаты съемки используются для построения экспериментальной зависимости температуры спая ТП от времени: $T_{tc}(t)$.

2.3. Особенности методики

2.3.1. Первая особенность методики

Первой особенностью является охлаждение воздуха в камере при откачке вакуум-насосом. Величина падения температуры воздуха в камере, регистрируемая ТП, достигает примерно 9 град. (например, с 25 до 16 °С), после чего падение температуры прекращается из-за конкуренции упомянутого процесса охлаждения с нагревом воздуха стенками камеры. После выключения вакуум-насоса происходит восстановление комнатной температуры воздуха в камере с характерным временем $\tau_{ev} \approx 6$ с. Поскольку промежуток времени от момента выключения вакуум-насоса до начала наполнения камеры воздухом из ресивера (момента срабатывания электропневмоклапана) намного превышает τ_{ev}, влиянием упомянутого охлаждения на скачок температуры воздуха в камере при добавлении воздуха из ресивера можно пренебречь.

2.3.2. Вторая особенность методики

Второй особенностью является нагрев воздуха в ресивере в процессе наполнения ресивера воздухом до рабочего давления (1 МПа). Хотя величина возникающего нагрева не регистрировалась, им также можно пренебречь по причине, указанной в п. 2.3.1. Действительно, интенсивность процессов теплообмена воздуха со стенками ограничивающего объема увеличивается с уменьшением габаритов объема, а промежуток времени от момента окончания наполнения ресивера до начала наполнения камеры намного превышает τ_{ev}. Другими словами, к моменту начала наполнения камеры можно пренебрегать отличием температуры сжатого воздуха в ресивере от комнатной.

2.3.3. Третья особенность методики

Третья особенность касается высокой инерции ТП. Скачок температуры воздуха в камере, возникший за время наполнения камеры воздухом из ресивера (примерно 0,2 с), в последующие моменты времени снижается до комнатной температуры из-за теплообмена воздуха со стенками камеры. Грубая оценка характерного времени τ_a такого снижения дает $\tau_a \approx \tau_{ev} \approx 6$ с. Поскольку $\tau_{tc} \approx 3$ с, имеют место соотношения:

$$\tau_r << \tau_{tc} < \tau_a. \qquad (1)$$

Согласно (1) максимум на графике $T_{tc}(t)$ не будет отвечать максимальному изменению температуры воздуха, возникающему к концу наполнения камеры воздухом из ресивера. Это обусловлено задержкой измерения температуры воздуха в камере (инерцией ТП), за время которой температура воздуха в камере успеет снизиться ввиду того, что τ_{tc} и τ_a являются величинами одного порядка.

Для прогнозирования реального значения скачка температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера используется математическая модель теплообмена, описанная в следующем разделе работы.

3. Результаты исследования

На рис. приводится экспериментальная (в дискретных символах) зависимость температуры спая термопары от времени $T_{tc}(t)$ по методике, изложенной в п. 2.2. График зависимости демонстрирует нагрев спая ТП примерно на 14 град. (до 39 °С), а затем сравнительно медленную релаксацию температуры спая (с характерным временем порядка 5 с) к начальному комнатному значению (25 °С).

Как было показано в п. 2.3.3, реальное значение скачка температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера должно быть выше. Оценим реальное значение упомянутого скачка температуры на основе следующей простой математической модели рассматриваемых процессов.

Уравнения теплообмена между воздухом в камере и ее стенками и теплообмена между воздухом в камере и спаем термопары имеют следующий вид:

$$T'_a = (T_0 - T_a)/\tau_1;\ T'_{tc} = (T_0 - T_{tc})/\tau_2\,. \qquad (2)$$

Начальные условия: $T_a(0) = T_{a,\max}$; $T_{tc}(0) = T_0$. С учетом первого неравенства из (1) считается, что скачок температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера происходит мгновенно, т.е. момент времени $t = 0$ рассматривается как начало и окончание процесса накачки.

Решением (2) являются функции:

$$T_a(t) = T_0 + (T_{a,\max} - T_0)\cdot\exp(-t/\tau_1);$$
$$T_{tc}(t) = T_0 + (T_{a,\max} - T_0)[\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)]/(1 - \tau_2/\tau_1),$$

где T_a — характерная (средняя) температура воздуха в камере, °С;

T_{tc} — температура спая термопары в объеме камеры, °С;

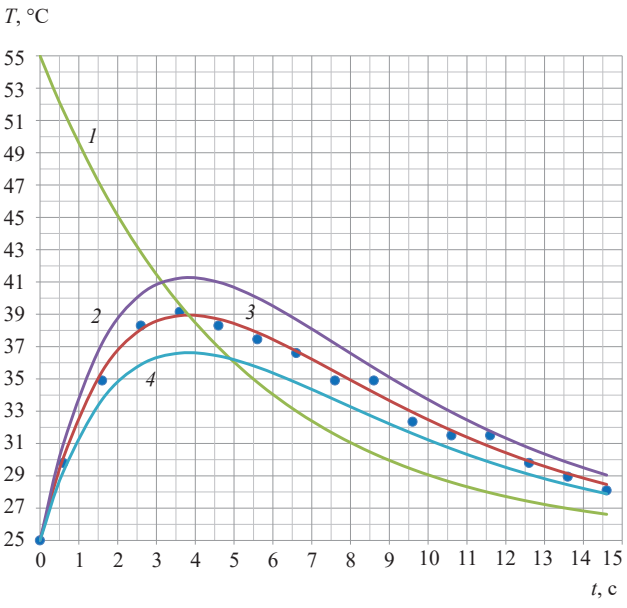
штрих (′) при переменной означает производную переменной по времени;

t — время, с;

T_0 — температура стенки камеры, $T_0 = 25$ °С;

τ_1 — характерное время теплообмена нагретого воздуха в камере со стенками камеры, с;

τ_2 — инерция термопары, с;



Расчетная зависимость температуры воздуха в камере от времени (кривая *1*); экспериментальная (дискретные символы) и расчетные (кривые *2*, *3* и *4*) зависимости температуры спая термопары от времени. Кривые *1* и *3* отвечают начальному ($t = 0$) скачку температуры в камере на 30 град; кривые *2* и *4* — начальному скачку температуры в камере на 35 и 25 град. соответственно

Design dependence of the air temperature in the chamber on time (curve *1*); experimental (discrete symbols) and design (curves *2*, *3* and *4*) dependences of the thermocouple temperature on time. Curves *1* and *3* correspond to the initial ($t = 0$) temperature jump in the chamber by 30 degrees; lines *2* and *4* correspond to the initial temperature jump in the chamber by 35 degrees and 25 degrees, respectively

$T_{a,\max}$ — максимальная (к моменту окончания накачки камеры) температура воздуха в камере, °C.

Полагая величины τ_1, τ_2 и $T_{a,\max}$ неизвестными параметрами системы (2)–(4), подбираем их таким образом, чтобы среднеквадратическое отклонение расчетной зависимости температуры спая $T_{tc,cal}(t)$ от экспериментальной зависимости данного параметра $T_{tc,exp}(t)$ было наименьшим. Хотя значение каждого из параметров влияет на всю форму расчетной зависимости $T_{tc,exp}(t)$, можно отметить приоритетное влияние τ_1, τ_2 и $T_{a,\max}$ на крутизну заднего и переднего фронтов, а также на высоту графика этой зависимости соответственно, что значительно облегчает поиск наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Расчеты показали, что наименьшее отклонение наблюдается при $\tau_1 \approx 5$ с, $\tau_2 \approx 3$ с, $T_{a,\max} = 55$ °C (см. рисунок, кривая *3*). Для демонстрации заметного отклонения расчетной зависимости $T_{tc,cal}(t)$ от экспериментальной при малом изменении $T_{a,\max}$ на рис. дополнительно приводятся расчетные зависимости для случая $T_{a,\max} = 60$ °C (кривая *2*) и $T_{a,\max} = 50$ °C (кривая *4*) при $\tau_1 = 5$ с, $\tau_2 = 3$ с. Отметим близость значений параметров $\tau_2 \approx \tau_{tc}$.

4. Обсуждение результатов

Согласно графику $T(t)$ на рисунке, температура воздуха в камере после окончания процедуры ее наполнения воздухом из ресивера испытывает скачок на (55 – 25) = 30 град.

Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений температуры спая ТП поддерживает уверенность в правомерности использованного метода оценки скачка температуры.

Близость значений $\tau_2 \approx \tau_{tc}$ указывает на возможность пренебречь влиянием движения нагретого воздуха в камере на инерцию ТП, которая определялась в неподвижной нагретой среде.

Полученная расчетно-экспериментальная оценка скачка температуры (30 °C) не противоречит термодинамическим расчетам [6], согласно которым эта величина находится в интервале значений от 12 до 51 град.

С учетом известного увеличения температуры в камере (на 80 град. [10]), вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж, ASTM E1515–14[2]), начальная температура среды при исследовании взрыва пыли в 20-литровой камере может достигать значения (25 + 30 + 80) = 135 °C. Это значение существенно превышает величину 25 °C, которая подразумевается разработчиками стандартной методики исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере.

5. Выводы

С использованием термоэлектрического преобразователя ВР 5/20 измерено увеличение температуры воздуха в квазисферической камере, предназначенной для стандартного исследования показателей взрыва аэровзвесей, на стадии добавления воздуха из ресивера. Результат измерения составил 14 град.

Предложена математическая корректировка данного результата, учитывающая сопоставимость тепловой инерции термоэлектрического преобразователя и характерного времени охлаждения воздуха в камере ее стенками. Показано, что реальный прирост начальной температуры в камере на стадии добавления воздуха из ресивера составляет 30 град.

С учетом известного увеличения температуры в камере (на 80 град.), вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж), реальное значение начальной температуры среды при исследовании взрыва пыли в 20-литровой камере может достигать (25 + 30 + 80) = 135 °C. Эта величина значительно превышает значение 25 °C, предполагаемое разработчиками стандартной методики исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries 3rd edition. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. *Castellanos D., Carreto V., Skjold T., Yuan S., Chaudhari P., Mannan M.S., Mashuga C.* Construction of a 36 L dust explosion apparatus and turbulence flow field comparison with a standard 20 L dust explosion vessel // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 55. Pp. 113–123. DOI:10.1016/j.jlp.2018.05.014
3. *Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A.* Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m^3 // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484
4. *Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C.* Classification of particle breakage due to dust dispersion // Powder technology 2019. Vol. 342. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
5. *Di Sarli V., Russo P., Sanchirico R., Di Benedetto A.* CFD simulations of the effect of dust diameter on the dispersion in the 20 L bomb // Chemical Engineering Transactions. 2013. Vol. 31. Pp. 727–732. DOI: 10.3303/CET1331122
6. *Полетаев Н.Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-литровой камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. *С. 5–20.* DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
7. *Rodgers S.A., Ural E.A.* Practical issues with marginally explosible dusts — evaluating the real hazards // Process Safety Progress. 2011. Vol 30. Issue 3. Pp. 266–279. DOI: 10.1002/prs.10436
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-m^3 chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. *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-m^3 test chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
10. *Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.* Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1988. Vol. 21. Issue 1. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
11. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m^3 Chambers // Combustion Science and Technology. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
12. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the "20 l sphere" and with the standard "ISO 1 m^3 vessel" // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
13. *Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L.* Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1 m^3 vessels // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000; 13(3-5): 209-219. DOI: 10.1016/s0950-4230(99)00043-1
14. *Di Benedetto A., Garcia-Agreda A., Russo P., Sanchirico R.* Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 51 (22). Pp. 7663–7670. DOI: 10.1021/ie201664a
15. *Сорокин Д.И., Джусов О.П.* Динамические характеристики термопар. Обнинск, 1973. 31 с.

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries* : 3rd edition. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. Castellanos D., Carreto V., Skjold T., Yuan S., Chaudhari P., Mannan M.S., Mashuga C. Construction of a 36 L dust explosion apparatus and turbulence flow field comparison with a standard 20 L dust explosion vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 55:113-123. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.05.014
3. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m^3. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484

4. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion. *Powder technology*. 2019; 342:204-213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
5. Di Sarli V., Russo P., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of the effect of dust diameter on the dispersion in the 20 L bomb. *Chemical Engineering Transactions*. 2013; 31:727-732. DOI: 10.3303/CET1331122
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. Rodgers S.A., Ural E.A. Practical issues with marginally explosible dusts — evaluating the real hazards. *Process Safety Progress*. 2011; 30(3):266-279. DOI: 10.1002/prs.10436
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-m^3 chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. 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-m^3 test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
10. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1988; 21(1):303-313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
11. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m^3 chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
12. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the "20 l sphere" and with the standard "ISO 1 m^3 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
13. Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m^3 vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000; 13(3-5):209-219. DOI: 10.1016/s0950-4230(99)00043-1
14. Di Benedetto A., Garcia-Agreda A., Russo P., Sanchirico R. Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 51(22):7663-7670. DOI: 10.1021/ie201664a
15. Sorokin D.I., Dzhusov O.P. *Dynamic characteristics of thermocouples*. Obninsk, 1973; 31. (rus).

Поступила 26.08.2021, после доработки 03.09.2021;
принята к публикации 09.09.2021
Received August 26, 2021; Received in revised form September 3, 2021;
Accepted September 9, 2021

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, 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, VNIIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC:1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 30–41
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):30-41

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 641.841
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.30-41

Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения

Евгений Юрьевич Круглов✉, Роза Михайловна Асеева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе приводятся результаты исследования двух стадий термоокислительного разложения древесины. Первая стадия термоокислительного разложения относится к пламенному горению, после которой вследствие образования угольного слоя на поверхности древесины пламенное горение переходит к беспламенному. Беспламенный процесс сопровождается не только гетерогенным горением, по меньшей мере происходят три реакции: пиролиз, термоокислительная деструкция древесины и окисление образующегося кокса.
Цель и задачи. Определить показатели обугливания и тепловыделения при воздействии внешнего радиационного теплового потока на образцы хвойной и лиственной породы с применением стандартного кон-калориметра с акцентом на беспламенное горение.
Методы. Характеристики тепловыделения определяли с помощью стандартного проточного калориметра OSU фирмы Atlas (США) при воздействии внешнего радиационного теплового потока 20, 35 и 52 кВт/м^2. Низшую теплоту полного сгорания у образцов обугленного слоя определяли с помощью бомбового калориметра C-5000.
Результаты. Проведен анализ обугливания и характеристик тепловыделения образцов древесины разных пород толщиной 10 и 25 мм при горении под действием внешнего радиационного теплового потока плотностью 20, 35 и 52 кВт/м^2 по результатам испытаний, проведенных на калориметре OSU. Дана оценка скорости обугливания и толщины кокса при пламенном и беспламенном горении, эффективной теплоты сгорания и коэффициента полноты сгорания, а также усадки образца. Показано, что переход от пламенного к гетерогенному горению происходит по окончании квазистационарного горения образцов древесины, что соответствует окончанию кривых скорости тепловыделения и означает переход от поведения термически толстого материала к термически тонкому.
Вывод. Полученные экспериментальные данные позволяют прогнозировать изменение физических и теплотехнических свойств, характеристик тепловыделения при пламенном и беспламенном горении древесины разных пород с учетом образованного угольного слоя на ее поверхности в условиях воздействия разных тепловых потоков.

Ключевые слова: проточный калориметр; деревянное домостроение; гетерогенное горение древесины; прогнозирование; обугливание древесины

Для цитирования: *Круглов Е.Ю., Асеева Р.М.* Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 30–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.30-41

✉ Евгений Юрьевич Круглов, e-mail: 89268196698@mail.ru

Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics

Evgeniy Yu. Kruglov✉, Roza M. Aseeva

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

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of a research on the two stages of thermal decomposition of timber. The first stage of thermal decomposition is flame combustion, which is followed by a transition to flameless combustion due to the formation of a char layer on the surface of wood. The flameless process is accompanied not only by heterogeneous combustion, but, at least, three reactions: pyrolysis, thermal oxidative destruction of wood and oxidation of resulting coke.
Goals and objectives. The goal is to identify the criteria of charring and heat release under the influence of an external radiative heat flux on samples of coniferous and deciduous species of wood using a standard flow-through calorimeter with a focus on flameless combustion.

© Е.Ю. Круглов, Р.М. Асеева, 2021

Methods. A standard OSU flow-through calorimeter, produced by Atlas (USA), was used to identify heat release characteristics under the influence of external radiative heat fluxes that had the density of 20, 35 and 52 kW/m^2. The lower limit of heat, released in the complete combustion of samples, that had a char layer, was identified using bomb calorimeter C-5000.

Results. The co-authors analyzed the charring process and characteristics of heat release using samples of wood species that were 10 and 25 cm thick. Wood samples were exposed to combustion under the influence of an external radiative heat flux that had the density of 20, 35 and 52 kW/m^2 subsequent to the results of tests, conducted using the OSU calorimeter. The co-authors evaluated the charring velocity and the coke layer thickness for the cases of flame and flameless combustion; efficient combustion heat release and the combustion completeness coefficient, as well as the sample shrinkage. The co-authors demonstrated that a transition from flame combustion to heterogeneous combustion occurs upon completion of the quasi-neutral burning of wood samples, which corresponds to the final point of heat release velocity curves and marks a transition from the behaviour of a thermally thick material to that of a thermally thin material.

Conclusion. The obtained experimental data allow to forecast a change in the physical and heat engineering properties, characteristics of heat release in the processes of flame and flameless combustion of different wood species with account taken of the char layer formed on its surface under the influence of various heat fluxes.

Keywords: flow-through calorimeter; wooden house construction; heterogeneous wood combustion; forecasting; wood charring

For citation: Kruglov E.Yu., Aseeva R.M. Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):30-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.30-41 (rus).

✉ Evgeniy Yuryevich Kruglov, e-mail: 89268196698@mail.ru

Введение

В таких странах, как США, Канада, Австрия, Финляндия, Норвегия, древесина является одним из наиболее применяемых строительных материалов для несущих и ограждающих строительных конструкций при строительстве деревянных небоскребов различного функционального назначения. Об этом свидетельствуют примеры уже построенных объектов: в настоящее время самый высокий деревянный небоскреб построен в 2019 г. в Норвегии, г. Брумунддаль, который называется Mjøstårnet[1]; в 2017 г. в Канаде, г. Ванкувер построено студенческое общежитие Brock Commons[2]; в Вене (Австрия) построен объект Hoho Wien[3] (рис. 1).

В России деревянное домостроение развивается в основном в жилом секторе, его доля составляет 24 %[4]. Согласно, статистическим данным [1], в зданиях жилого сектора ежегодно в среднем погибает 91,5 % людей от общего количества погибших при пожаре по стране за период с 2015 по 2018 годы. На данный вид объектов в среднем приходится 69,7 % (2015–2018 годы) пожаров от общего количества. Нужно отметить, что в 2018 г. динамика имела возрастающий характер — данный показатель вырос на 0,8 % по сравнению с показателями 2017 г. Причины, которые могут оказывать влияние на показатели статистики по количеству пожаров и гибели людей, рассмотрены в работе [2]. Одной из наиболее важных проблем авторы считают отсутствие рекомендаций по применению эффективных решений, снижающих вероятность возникновения беспламенного или пламенного горения на объектах с деревянными конструкциями и материалами.

В работах [3, 4] подробно рассмотрены способы повышения огнестойкости ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с разной комбинацией защитных облицовок. За счет применения полимерной теплоизоляции PENOCOM значения пределов огнестойкости строительных конструкций возрастают до 95…110 мин (по предельным состояниям по огнестойкости EI) для стен и перегородок без учета нагрузки.

Современные тенденции применения древесины в строительстве требуют переосмысления и более глубокого изучения закономерностей горения как самой древесины, так и материалов на ее основе, в особенности при беспламенном горении, которое при определенных условиях может переходить в пламенное. В работе [5] показана эффективность применения огнезащитного состава, направленного для снижения пожарной опасности теплоизоляции на основе вторичного целлюлозного сырья за счет перевода режима горения от пламенного в беспламенный. В [6–10] изучен прогрев материалов, используемых в автотранспортной отрасли промышленности, и древесины сосны при тлеющем горении в лабораторных условиях в разных режимах, где также рассмотрен вопрос образования формирующихся опасных факторов пожара.

[1] *Агеев А.* В Норвегии построен самый высокий деревянный небоскреб в мире. URL: https://www.techcult.ru/technology/6545-samyj-vysokij-derevyannyj-neboskreb-v-mire

[2] *Байназаров Н.* В Канаде построили самое высокое деревянное здание в мире. URL: https://rb.ru/news/the-tallest-wooden-building/

[3] *Конова Е.* В Вене построили деревянный небоскреб HoHo Wien. Как он выглядит. URL: https://realty.rbc.ru/news/5d7a409c9a794733db5c81f1

[4] Минпромторг России. Направления развития лесопромышленного комплекса России. URL: http://www.papfor.com/RXRU/RXRU_PapFor_v2/documents/2016/forum_materials/2.2._Minpromtorg_Golub.pdf?v=636147364053214896

a *b* *c*

Рис. 1. Примеры современных деревянных зданий: общежитие в г. Ванкувер, Канада (*a*), многофункциональные здания Mjøstårnet, г. Брумунддаль, Норвегия (*b*) и HoHo Wien, г. Вена, Австрия (*c*)

Fig. 1. Examples of modern wooden buildings: a hostel in Vancouver, Canada (*a*), multifunctional buildings Mjøstårnet, Brumunddal, Norway (*b*), HoHo Wien, Vienna, Austria (*c*)

Древесина по своим физико-химическим характеристикам является природным полимерным композитом и типичным представителем органических материалов, карбонизующихся (обугливающихся) при нагревании и горении. Выяснению факторов, которые влияют на обугливание древесины, его скорость, а также толщину и свойства обугленного слоя, посвящено огромное число работ. Многолетние испытания по обугливанию древесины проводились, в основном, по двум направлениям:

1) определение зависимости обугливания от условий внешнего огневого воздействия (плотности радиационного теплового потока и времени, метода испытания), а также от самого материала (породы и разновидности, его влажности, плотности и прочих свойств);

2) обугливание древесины при инициировании пожара горючей жидкостью.

Первое направление тесно связано с проблемой огнестойкости строительных конструкций и объектов в целом. Знание скорости обугливания древесины дает возможность определять остаточную эффективную площадь сечения конструкций и, соответственно, их несущую способность, что важно при проектировании строительства разных сооружений с заданным уровнем пожарной безопасности. Второе направление связано с экспертизой состоявшихся пожаров, установлением причин (возможности поджога) и места возникновения очага пожара, его интенсивности, продолжительности.

В обзоре [11] представлен анализ параметров обугливания древесины, полученных при контролируемых условиях огневого воздействия с применением стандартных мало-, средне- и крупномасштабных установок, а также натурных испытаний пожаров в комнатах и деревянных зданиях. При развитом пожаре в комнатах средние тепловые потоки на потолок составляют 91 кВт/м^2, на стены и пол соответственно приходится 138 кВт/м^2 и 84 кВт/м^2. Отмечено важное влияние на скорость обугливания деревянных конструкций эффекта вентиляции, доступа кислорода воздуха к зоне реакции горения, а также наличия промежутков между досками и различных типов их соединений. Корреляционные формулы для расчета скорости и глубины обугливания древесины в условиях стандартного режима пожара и при действии внешнего радиационного теплового потока постоянной плотности по результатам испытаний приведены в работах [11–16]. Проблема пожарной экспертизы отражена в [15–18]. В работе [19] установлено, что существенный вклад в беспламенное, тлеющее горение древесины вносит реакция гетерогенного окисления карбонизованных продуктов. Она является диффузионно-контролируемой и характеризуется высокими значениями энергии активации — до 285 кДж/моль.

От скорости обугливания, а также толщины обугленного слоя древесины зависят массовая скорость выделения горючих продуктов и, соответственно, характеристики тепловыделения. В справочнике [20] приведены результаты изучения характеристик тепловыделения древесины лиственных и хвойных пород в зависимости от плотности внешнего радиационного потока, объемной плотности древесины, ориентации, толщины образцов и других факторов. В [21] определены средние значения скорости тепловыделения, скорости потери массы и обугливания, некоторые свойства обугленного слоя (объемная плотность, фактор усадки) при тепловом потоке 15…55 кВт/м^2. При реальном пожаре прогорание деревянных конструкций может происходить в течение нескольких минут, при этом скорость обугливания может достигать больших значений (2,5…3,5 мм/мин и выше [11]). Приведенные данные отражают режим пламенного горения. Обугливанию и характеристикам тепловыделения, другим показателям при беспламенном горении древесины уделено недостаточное внимание.

Впервые тлеющее горение цельной древесины (дуба и сосны) исследовал T. Ohlemiller при иници-

ировании процесса раскаленной проволокой, разной скорости потока воздуха и его направления относительно движения волны тления [22]. Была определена скорость тления, в том числе на пределе перехода в пламенное горение [22–24]. Влияние внешнего радиационного теплового потока и концентрации кислорода на скорость газификации древесины сосны, выделение CO и CO_2 в беспламенном режиме изучено в [25]. Показано, что кислород увеличивает скорость потери массы по сравнению с инертной средой, почти в два раза ускоряет образование кокса и увеличивает его толщину. При тепловом потоке выше 40 кВт/м^2 наблюдалось спонтанное воспламенение древесины.

В настоящей работе была поставлена задача определить показатели обугливания и тепловыделения при воздействии внешнего радиационного теплового потока на образцы хвойной и лиственной породы с применением стандартного кон-калориметра с акцентом на беспламенное горение.

Материалы и методы исследования

В качестве образцов хвойных пород была взята древесина сосны и ели, а в качестве лиственных — березы и дуба, произрастающих в средней полосе страны. Кроме того, использовали древесину сосны из Краснодарского края и березы каменной из региона Петропавловска-Камчатского. Образцы размером 150 × 150 × 10 мм предварительно высушивали до постоянного веса и затем хранили в герметичной упаковке до последующих испытаний. Характеристики тепловыделения определяли с помощью стандартного проточного калориметра OSU марки HRR-3 фирмы Atlas (США) при действии внешнего радиационного теплового потока 20, 35 и 52 кВт/м^2. Описание установки и процедуры определения конкретных характеристик тепловыделения, полученные результаты приведены ранее в [26, 27]. На отдельных этапах процесса тепловыделения при горении березы каменной и сосны из Краснодарского края определяли толщину кокса и потери массы образца. У отобранных обугленных слоев определяли низшую теплоту полного сгорания с помощью бомбового калориметра C-5000. Более детальное изучение обугливания и характеристик тепловыделения при пламенном и беспламенном горении проведено с помощью проточного калориметра на примере образца древесины сосны толщиной 25 мм при q_e = 20 кВт/м^2. В этом случае синхронно измеряли температуру в реперных точках образца, потери массы на отдельных этапах процесса горения. Для фиксации стадии пламенного горения и перехода к беспламенному этапу использовали видеосъемку.

Результаты и их обсуждение

Важной характеристикой древесины является объемная (кажущаяся) плотность, которая отражает химический состав и структуру природного композита и определяет многие его свойства, в том числе и физико-механические [28]. Зарубежные работы и собственные наблюдения показывают, что обугливание древесины при горении носит нелинейный характер по времени и интенсивности нагрева.

При применении образцов древесины большой толщины, проявляющих при воздействии внешнего теплового потока поведение термически толстых материалов, кривые скорости тепловыделения характеризуются наличием одного пика. Он наблюдается вслед за воспламенением образца. После достижения максимального значения скорость тепловыделения снижается из-за нарастания толщины обугленного слоя древесины. Затем до конца испытания процесс выделения тепла протекает в квазистационарном режиме [21]. В случае образцов древесины с меньшей толщиной (10…20 мм) наблюдаются два пика на кривых скорости тепловыделения. На рис. 2 показаны типичные кривые, полученные для образцов сосны и дуба в зависимости от времени при плотности теплового потока 35 кВт/м^2. Первый пик отражает этап пламенного горения, второй относят обычно к гетерогенной реакции окисления образующегося кокса. Между пиками наблюдается площадка, протяженность которой уменьшается с ростом плотности внешнего теплового потока [26, 27]. Наличие второго пика позволяет оценить некоторые параметры беспламенного этапа горения древесины.

Представляло интерес выяснить, когда начинается этап беспламенного горения древесины: сразу после окончания первого пика на кривой скорости тепловыделения или в начале второго пика.

Результаты видеосъемки картины процесса горения древесины сосны в кон-калориметре при 20 кВт/м^2 однозначно свидетельствуют, что гетерогенный, беспламенный этап горения начинается после окончания площадки квазистационарного режима процесса тепловыделения. При пламенном горении пламя охватывает всю поверхность образца, препятствуя доступу кислорода воздуха к поверхности образца. В результате разложение материала и выделение летучих продуктов происходит в режиме пиролиза.

Расчет средней скорости обугливания при пламенном горении древесины β проведен по формуле [11]:

$$\beta = 113 q_e^{1/2} / r\tau^{1/3}, \quad (1)$$

где q_e — плотность внешнего радиационного теплового потока, кВт/м^2;

ρ — объемная плотность древесины, кг/м^3;

τ — время пламенного горения, мин.

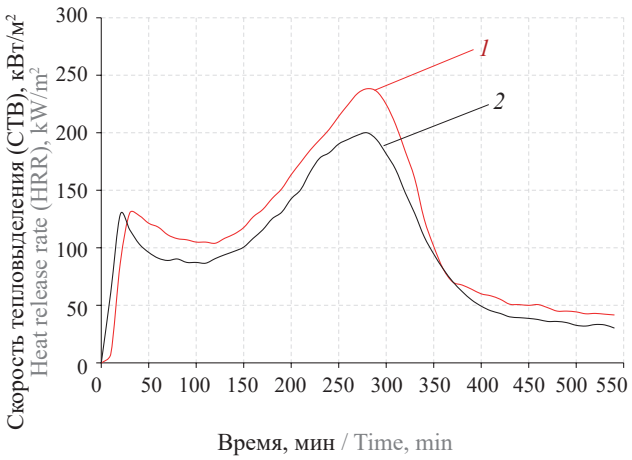


Рис. 2. Изменение скорости тепловыделения при горении древесины сосны (*1*) и дуба (*2*) при воздействии внешнего теплового потока, равного 35 кВт/м²

Fig. 2. A change in the rate of heat release during the combustion of pine (*1*) and oak (*2*) wood under the influence of an external heat flux of 35 kW/m²

Для расчета использованы характеристики тепловыделения, полученные ранее при номинальных значениях плотности внешнего теплового потока 20…52 кВт/м² [26, 27]. Полагают, что после достижения температуры поверхности T_s, соответствующей началу пиролиза и воспламенению древесины, происходит быстрое увеличение массового потока летучих продуктов до максимального значения с образованием тонкого слоя кокса. Далее массовый поток летучих продуктов снижается из-за нарастания толщины кокса. В период активного выделения летучих продуктов пиролиза становятся важными тепловые потери конвекцией и излучением от поверхности [29]. В таблице показаны результаты расчета показателей обугливания с поправкой на теплопотери:

$$q_{net} = q_e - h_{кон}(T_s - T_o) - \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_o^4),$$

где $h_{кон}$ — конвективный коэффициент теплопередачи, принят равным 15 кВт/м²;

$\varepsilon = 0{,}9$ — коэффициент излучения [30];

Таблица 1. Влияние плотности теплового потока на среднюю скорость обугливания и толщину слоя кокса при пламенном горении древесины

Table 1. The influence of the heat flux density on the average charring rate and the thickness of the coke layer during the flame combustion of wood

Образец Sample	Плотность ρ, кг/м³ Density ρ, kg/m³	Радиационный тепловой поток q_e, кВт/м² Radiation heat flux q_e, kW/m²	Время пламенного горения $\tau_{пл}$, мин Flame combustion time τ_{fl}, min	Скорость обугливания β, мм/мин Charring rate β, mm/min	Толщина обугленного слоя δ, мм Char layer thickness δ, mm
Сосна Pine	448	20 35 52	2,68 1,75 1,50	0,716 1,141 1,521	1,92 2,0 2,28
Сосна (Краснодарский край) Pine (Krasnodar region)	400	35	1,50/0,5*	1,277/1,97*	1,91/0,98*
Сосна (δ = 25 мм) Pine (δ = 25 mm)	422	20	10,45/0,97*	0,55/1,07*	5,75/1,04*
Ель Spruce	400	20 35 52	1,83 1,72 1,50	0,914 1,305 1,708	1,67 2,25 2,56
Береза Birch	567	20 35 52	1,83 1,49 1,08	0,644 0,966 1,34	1,18 1,44 1,46
Береза каменная Stone birch	833	35	3,0/1,0*	0,521/0,78*	1,56/0,78*
Дуб Oak	638	20 35 52	3,04 1,99 1,50	0,480 0,767 1,067	1,46 1,53 1,60

** Показатели, соответствующие пиковым значениям скорости тепловыделения.*

** Indicators corresponding to the peak values of the rate of heat release.*

σ — константа Стефана – Больцмана (5,67 × × 10^{-8} Вт/м^2 К^4);

T_s согласно измерению температуры равна 278 °С.

Легко заметить, что с увеличением плотности внешнего теплового потока растут средняя скорость обугливания и толщина слоя кокса. У лиственных пород древесины за период пламенного горения закономерно наблюдаются более низкие значения скорости обугливания и толщины слоя кокса по сравнению с хвойной древесиной. При пиковой скорости тепловыделения на этапе пламенного горения древесины действительно образуется тонкий слой кокса. Чтобы понять, насколько обоснованно применение формулы (1) для оценки скорости обугливания и толщины слоя кокса, сравним результаты расчета с экспериментальными значениями толщины слоя кокса у образцов древесины при q_e = 35 кВт/м^2 за такой же период пламенного горения горизонтально расположенных образцов в соответствии с ГОСТ 30402–96[5] (аналогичный метод описан в ГОСТ Р ИСО 5660-1–2020[6]). В частности, толщина обугленного слоя у образцов древесины ели при испытании на стандартном калориметре OSU составила 2,25 мм, а по ГОСТ 30402–96 — 2,93 мм; сосны — 2,0 и 2,4 мм; дуба — 1,53 и 1,6 мм соответственно. Полученные значения сопоставимы и закономерно выше при горизонтальной ориентации образцов. Известно, что в этом случае максимальная скорость тепловыделения и скорость потери массы выше из-за большего вклада теплового потока в воздействие пламени на поверхность горящего образца [20]. Таким образом, можно сделать вывод, что формула (1) пригодна для оценки скорости обугливания древесины при пламенном горении, но можно ли применять ее при беспламенном горении, этот вопрос остается открытым. Объемная плотность тонкого слоя кокса, образующегося при максимальной скорости тепловыделения на этапе пламенного горения древесины сосны из Краснодарского края и березы каменной при q_e = 35 кВт/м^2, составила 179,7 и 238 кг/м^3 соответственно. У образца сосны из средней полосы страны при q_e = 20 кВт/м^2 объемная плотность тонкого слоя кокса — 155 кг/м^3. Определить плотность кокса позволило измерение потери массы образцов при пиковой скорости тепловыделения:

$$m'' = (\rho_д - \rho_к)\beta, \quad (2)$$

откуда

$$\rho_к = (\rho_д \beta m'')/\beta, \quad (3)$$

где $\rho_д$ и $\rho_к$ — плотность исходной древесины и кокса соответственно, кг/м^3;

m'' — скорость потери массы на единицу площади образца, кг/(м^2 · мин).

В одинаковых условиях внешнего теплового воздействия при q_e = 35 кВт/ м^2 наблюдается более высокая объемная плотность кокса у лиственной древесины. У древесины сосны плотность кокса возрастает с увеличением интенсивности радиационного теплового потока от 20 до 35 кВт/м^2, что согласуется с результатами работы [21]. Обращает на себя внимание то, что с увеличением толщины образца древесины сосны протяженность участка квазистационарного режима пламенного горения при внешнем тепловом потоке 20 кВт/м^2 существенно возрастает. Это сказывается на средней скорости обугливания древесины при пламенном горении и толщине кокса. В подобных условиях теплового воздействия поведение образца можно считать термически толстым на этапе пламенного горения. Интересно, что у образца толщиной 10 мм к концу пламенного горения также значительная часть древесины сохраняется еще не разложившейся. Отсюда следует важный вывод, что в последующем беспламенном горении древесины происходит не только гетерогенное горение кокса. В процессе беспламенного горения происходят по меньшей мере три реакции: пиролиз, термоокислительная деструкция древесины и окисление образующегося кокса. Подтверждением этому выводу служит факт, что после окончания пламенного горения (на 10,45-й минуте) толщина обугленного слоя у образца сосны составляет всего 5,75 мм, а температура на отметке 12,5 мм равна 182 °С, и фронт пиролиза достигает ее только через 5 мин. Он соответствует восходящей ветви второго пика СТВ, связанного с гетерогенным процессом. По изменению динамики температуры в центре и на обратной стороне образца можно заключить о переходе процесса тлеющего горения образца в режим поведения термически тонкого материала. Температура на внешней стороне образца со стороны обогрева к этому моменту достигает почти 670 °С (рис. 3).

При горении происходит значительная усадка образца. После достижения максимальной СТВ на этапе тлеющего горения нисходящая ветвь кривой СТВ обусловлена выгоранием кокса, сопровождающегося усадкой образца. К концу испытания (42 мин) она составляет по толщине 62,8 %,

[5] ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 15 мая 1996 г.

[6] ГОСТ Р ИСО 5660-1–2020. Испытания по определению реакции на огонь. Интенсивности тепловыделения, дымообразования и потери массы. Часть 1 : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 октября 2020 г. № 923-ст.

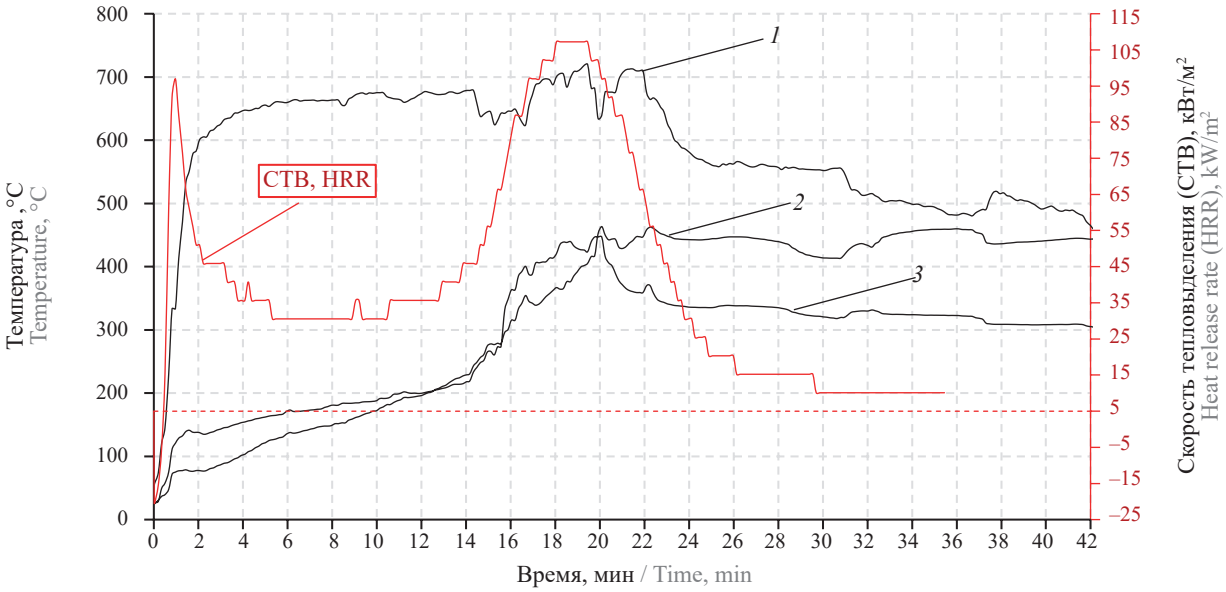


Рис. 3. Изменение скорости тепловыделения при горении древесины сосны при действии теплового потока q_e = 20 кВт/м² и росте температуры: *1* — на поверхности; *2* — в центре; *3* — на обратной стороне образца

Fig. 3. A change in the rate of heat release during combustion of pine wood under the action of q_e = 20 kW/m² and temperature: *1* — on the surface; *2* — in the centre; *3* — on the back side of the sample

по объему — 68,6 %. Масса образца после испытания равна 13 г. Вид его показан на рис. 4.

По всей высоте обугленного образца заметны трещины в поперечном направлении относительно волокон древесины. На обугленной поверхности наблюдаются возвышенности и впадины. В образовании возвышенностей, принимающих форму хребтов и пиков, прослеживается участие годичных колец. Впадины между ними имеют пористую структуру

Рис. 4. Вид образца древесины сосны после беспламенного горения

Fig. 4. A pine wood sample after flameless combustion

с очень мелкими порами. Объем конечного образца с учетом трещин составил 113 см³. Таким образом, можно оценить объемную плотность кокса полностью обугленного образца после испытания. Она составила 115 кг/м³. Измерение потери массы образца в период достижения максимального значения СТВ² позволяет рассчитать скорость обугливания на этом этапе беспламенного горения, решая обратную задачу и используя формулу (2): $\beta = m''\left(\rho_д - \rho_к\right)$.

Объемная плотность кокса к началу гетерогенного горения древесины принята средней между плотностью тонкого слоя кокса и плотностью кокса к концу испытания: $\rho_к = (155 + 115)/2 = 135$ кг/м³; $m'' = 36 \cdot 10^{-3}$ кг/0,0144 м² · 8,23 мин = 0,304 кг/(м² · мин). Тогда $\beta = 0{,}304/(422 - 135) = 1{,}06$ мм/мин.

Относительно высокая средняя скорость обугливания обусловлена вкладом в тепловой баланс большой экзотермики реакции окисления кокса. Пиковое значение $СТВ^2_{max}$ соответствует полному обугливанию образца древесины. Нисходящая ветвь кривой СТВ² связана с выгоранием и усадкой кокса. Характеристики тепловыделения на этапе беспламенного горения древесины приведены в табл. 2. Общее тепловыделение ОТВ² отнесено ко всему второму этапу горения.

Образцы древесины лиственной породы в режиме гетерогенного горения характеризуются более высоким тепловыделением по сравнению с древесиной хвойной породы. У образца березы наблюдаются самые высокие показатели, а показатели березы каменной превышают даже показатели древесины дуба. Полученные результаты дают возможность оценить эффективную теплоту сгорания древесины

Таблица 2. Влияние плотности внешнего теплового потока на характеристики тепловыделения древесины при беспламенном горении

Table 2. The influence of density of an external heat flux on heat release characteristics of wood during flameless combustion

Образец Sample	Плотность ρ, кг/м³ Density ρ, kg/m³	Радиационный тепловой поток q_e, кВт/м² Radiative heat flux q_e, kW/m²	$\tau^2_н$, мин τ^2_n, min	Время начала второго максимального пика скорости тепловыделения τ^2_{max}, мин The starting time of the 2nd maximum peak of the rate of heat release τ^2_{max}, min	Максимальная скорость тепловыделения второго пика $СВТ^2_{max}$, кВт/м² Maximum heat release rate of the second peak $СВТ^2_{max}$, kW/m²	Общее тепловыделение второго этапа (беспламенного горения) $ОТВ^2$, кВт · мин/м² Total heat release at the second stage (flameless combustion) THR^2, kW · min/m²
Сосна Pine	448	20 35 52	2,41 1,75 1,43	5,9 4,6 4,1	159,3 203,5 247,3	635,6 734,5 814
Сосна (25 мм) Pine (25 mm)	422	20	10,45	18,68	102,2	953,6
Сосна Краснодарский край Pine (Krasnodar region)	400	35	2,08	4,05	200,6	563,8
Ель Spruce	400	20 35 52	2,34 1,86 1,33	4,65 3,25 2,65	202,1 233,2 256,1	597,6 656,1 674,4
Береза Birch	567	20 35 52	1,83 1,50 1,05	4,73 3,59 3,06	321,9 400,5 459,6	985,6 1098,4 1288,4
Береза Каменная Stone birch	833	35	2,92	4,98	367,9	944,4
Дуб Oak	638	20 35 52	2,5 2,16 1,83	6,03 4,68 4,1	227,7 245,1 312,0	780,7 819,7 986,4

при беспламенном горении, а также коэффициент полноты сгорания, зная низшую теплоту полного сгорания исследуемых образцов. В работе определены значения низшей теплоты полного сгорания образцов древесины сосны краснодарской и березы каменной, а также угольных остатков, которые образуются в конце испытания характеристик тепловыделения. Они равны 18,11 и 17,63 кДж/г, а также 30,81 и 32,59 кДж/г соответственно. Низшие значения теплоты полного сгорания древесины у сосны из средней полосы России — 19,62 кДж/г; дуба — 18,76 кДж/г были известны ранее [26, 27]. На этапе гетерогенного горения значения эффективной теплоты сгорания древесины сосны краснодарской и березы каменной равны 9,97 и 8,03 кДж/г, а коэффициенты полноты сгорания 0,55 и 0,45 соответственно. У образца древесины сосны толщиной 25 мм при q_e = 20 кВт/м² эффективная теплота сгорания $\Delta H_{эфф} = ОТВ^2/\Delta m$ = 953,6/(115 – 45) = = 13,6 кДж/г; η = 0,69. На этапе беспламенного горения реализуется таким образом лишь часть тепловыделения от горения древесины за весь период.

Выводы

Установлено, что не только образцы древесины толщиной 10 мм, но и толщиной 25 мм характеризуются двумя пиками на кривых скорости тепловыделения при действии внешнего теплового потока 20…52 кВт/м². Между пиками наблюдается участок квазистационарного горения, протяженность которого снижается с ростом плотности внешнего теплового потока и увеличивается с ростом толщины образца.

Видеосъемка процесса горения древесины сосны однозначно указывает на то, что гетерогенный процесс горения начинается после окончания ква-

зистационарного периода. Оценка скорости обугливания и толщины слоя кокса на этапе пламенного горения приводит к выводу, что горение образцов древесины в этом случае протекает в режиме термически толстого материала. Переход к беспламенному горению означает переход к режиму поведения термически тонкого материала. При этом следует учитывать в механизме горения три реакции: пиролиз, окислительное разложение древесины и окисление кокса. На этом этапе скорость обугливания образца древесины сосны при q_e = 20 кВт/м^2 равна 1,06 мм/мин, эффективная теплота сгорания $\Delta H_{эфф}$ = = 13,6 кДж/г, коэффициент полноты сгорания η = 0,69. В период гетерогенного горения наблюдается большая усадка образца за счет выгорания кокса (по толщине 62,8 и 68,6 % по объему). Объемная плотность кокса к концу теста — 115 кг/м^3.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Полехин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г. и др.* Пожары и пожарная безопасность в 2018 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2019. 125 с.
2. *Круглов Е.Ю., Бабенко М.Д., Молочнюк А.С., Косов А.Н.* Проблемы пожарной безопасности деревянного домостроения на объектах жилого сектора // Ройтмановские чтения : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 11–13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880334
3. *Шутов Ф.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозита «PENOCOM» на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. № 1. С. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37
4. *Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Шутов Ф.А., Асеева Р.М.* Термогравиметрический анализ разложения полимерного пенокомпозита «PENOCOM» // Все материалы. Энциклопедический словарь. 2016. № 6. С. 30–34.
5. *Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Пижамов О.Ю., Рахматуллин Р.Р.* Поведение при нагреве неорганической теплоизоляции на основе вторичного целлюлозного сырья // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности : сб. тез. докл. мат. междунар. науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 299–303. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36843481
6. *Зайкина М.И., Решетов А.П., Трофимец В.Я.* Методика оценки термодинамических характеристик тлеющего горения в пористых почвенных системах на нефтегазовых объектах // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 2. С. 63–70.
7. *Зайкина М.И., Галишев М.А., Шидловский Г.Л.* Термодинамические характеристики тлеющего горения в пористых материалах // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 3. С. 63–70.
8. *Зайкина М.И., Галишев М.А.* Исследование изменения температурных режимов при горении пористых материалов // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2015. № 4. С. 35–38.
9. *Зайкина М.И.* Методика экспериментальной оценки характеристик тлеющего горения древесных материалов при внешнем тепловом воздействии // Казахстан в новой глобальной реальности: рост, реформы, развитие : мат. Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч. : курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов. Республика Казахстан, Кокшетауский технический институт, г. Кокшетау. 2016. С. 135.
10. *Зайкина М.И.* Проблема исследования процессов тлеющего горения на транспорте // Чрезвычайные ситуации: теория и практика. ЧС-2015 : мат. Междунар. науч.-практ. конф., Республика Беларусь, Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь. Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2015. С. 58.
11. *Babrauskas V.* Wood char depth: Interpretation in fire investigation. Proceedings of International Symposium on Fire Investigation. United Kingdom, 2004.
12. *White R.H., Nordheim E.V.* Charring rate of wood for ASTM E 119 Exposure // Fire Technology. 1992. Vol. 28. Issue 1. Pp. 5–30.

13. *Pofit-Szczepanska M.* The effect of physical properties of charcoal layer developed when wood is exposed o fire on the heat release rate // Proceedings of 25th Intern. Symposium on combustion processes, USA, Los-Angeles, 31.07-3.08.1994. 1994. Pp. 132–141.
14. *Syme D.* Verification of charring equation for Australian timber based on full-scale fire resistance test // Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference, Australia, Queensland Univ. of Technology. 1994. Vol. 1. Pp. 619–623.
15. *Lipinskas D., Maciulaitis R.* Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis // Journal of Civil Engineering and Management. 2005. Vol. 11. Issue 4. Pp. 299–307. DOI: 10.3846/13923730.2005.9636361
16. *Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Харьков А.Ю., Сорокин А.Н.* Влияние толщины легкого деревянного каркаса на скорость обугливания // Полимерные материалы пониженной горючести : мат. IX междунар. конф. (г. Минск, 20–24 мая 2019 г.). Минск : Белорусский государственный университет, 2019. С. 150–152.
17. *Смирнов К.П., Чешко И.Д, Егоров Б.С. и др.* Комплексная методика определения очага пожара. Л., 1986. 114 с.
18. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. М., 1999. 600 с.
19. *Круглов Е.Ю., Асеева Р.М.* Беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29 (1). С. 43–54. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54
20. *Tran H.C.* Experimental data on wood materials // Heat Release in Fires. Ch. 11, part b. Babrauskas V., Grayson S.J. (Eds.). New York : Elsevier Applied Science, 1992. Pp. 357–372.
21. *Tran H.C., White R.H.* Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter // Fire and Materials. 1992. Vol. 16. Pp. 197–206.
22. *Ohlemiller T.J.* Smoldering combustion propagation on solid wood // Fire Safety Sci. 1991. Vol. 3. Pp. 565–574.
23. *Rein G.* Smoldering combustion // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Hurley M.J. (editor-in-chief). 5th ed. New York, NY : Springer, 2016. Pp. 581–603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19
24. *Hadden R., Alkatib A., Rein G., Torero J.L.* Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size // Fire Technology. 2014. Vol. 50. Issue 3. Pp. 673–691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257
25. *Kashiwagi T., Ohlemiller T.J., Werner K.* Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine // Combustion and Flame. 1987. Vol. 69. Pp. 331–345.
26. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Барботько С.Л., Круглов Е.Ю.* Характеристики тепловыделения при горении древесины различных пород и видов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 7. С. 2–7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-teplovydeleniya-pri-gorenii-drevesiny-razlichnyh-porod-i-vidov
27. *Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B.* Fire behavior and fire protection in timber buildings. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 2014. 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
28. *Волынский В.Н.* Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины. Архангельск, 2000. 196 с.
29. *Wichman I.S., Atreya A.* A simplified model for the pyrolysis of charring materials // Combustion and Flame. 1987. Vol. 68. Pp. 231–247.
30. *Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D., Kent J.H.* An integral model for the transient pyrolysis of solid materials // Fire and Materials. 1997. Vol. 21. Pp. 7–16.

REFERENCES

1. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Dolakov T.B., Kozlov A.A., Matyushin Yu.A., Firsov A.G., Sibirko V.I. et al. *Fires and fire safety in 2018 : Statistical collection*. D.M. Gordienko (ed.). Moscow, 2019; 125. (rus).
2. Kruglov E.Yu., Babenko M.D., Molochnyuk A.S., Kosov A.N. Problems of fire safety of wooden housing construction at the objects of the residential sector. *Roitman Readings : Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. State Fire Academy of Emercom of Russia, 2020; 11-13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880334 (rus).

3. Shutov F.A., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Influence of polymeric foam composite "PENOCOM" on fire resistance of wood frame separating constructions. *Pozharovzryvobezopasnost /Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(1):28-37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37 (rus).
4. Kruglov E.Yu., Kobelev A.A., Shutov F.A., Aseyeva R.M. Thermogravimetric analysis of the decomposition of the polymer foam composite "PENOCOM". *All Materials. Encyclopaedic Reference Manual*. 2016; 6:30-34. DOI: 10.1134/S1995421217010142 (rus).
5. Pizhamov O.Yu., Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Rakhmatullin R.R. Thermal behavior of insulation from recycled cellulose-based raw material. *Historical experience, modern problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire safety : collection of abstracts of materials of the international scientific and practical conference*. Moscow, Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, 2018; 299-303. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36843481 (rus).
6. Zaykina M.I., Reshetov A.P., Trofimets V.Ya. Technique of assessment of thermodynamic characteristics of the smoldering combustion in porous soil systems on oil and gas objects. *Scientific analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia.* 2017; 2:63-70. (rus).
7. Zaykina M.I., Galishev M.A., Shidlovskiy G.L. Thermodynamic characteristics of glow combustion in porous materials. *Scientific analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia*. 2017; 3:63-70. (rus).
8. Zaykina M.I., Galishev M.A. Investigation of changes in temperature regimes during combustion of porous materials. *Supervision and forensic expertise in the security system*. 2015; 4:35-38. (rus).
9. Zaykina M.I. A technique for the experimental evaluation of the characteristics of smoldering combustion of wood materials under external heat exposure. *Materials of the international Scientific and Practical Conference of Young Scientists: cadets (students), listeners and adjuncts*. Kokshetau Technical Institute, 2016; 135 (kaz).
10. Zaykina M.I. The problem of researching the processes of smoldering combustion in transport. *Emergency Situations — 2015: Theory and Practice : Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Gomel, Gomel Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2015; 58. (rus).
11. Babrauskas V. Wood char depth: interpretation in fire investigation. *Proceedings of International Symposium on Fire Investigation*. United Kingdom, 2004.
12. White R.H., Nordheim E.V. Charring rate of wood for ASTM E 119 Exposure. *Fire Technology.* 1992; 28(1):5-30.
13. Pofit-Szczepanska M. The effect of physical properties of charcoal layer developed when wood is exposed of fire on the heat release rate. *Proceedings of 25th Intern. Symposium on combustion processes, USA, Los-Angeles, 31.07-3.08*. 1994; 132-141.
14. Sym D. Verification of charring equation for Australian timber based on full-scale fire resistance test. *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*. Australia, Queensland Univ. of Technology, 1994; 1:619-623.
15. Lipinskas D., Maciulaitis R. Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2005; 11(4):299307. DOI: 10.3846/13923730.2005.9636361
16. Kruglov E.Yu., Kobelev A.A., Kharkov A.Yu., Sorokin A.N. Effect of the thickness of a light timber frame on the rate of charring. *Low Flammability Polymeric Materials : Proceedings of the IX International Conference*. Belarusian State University, 2019; 150-152. (blr).
17. Smirnov K.P., Cheshko I.D., Egorov B.S. et al. *Comprehensive method for determining the source of fire*. Leningrad, 1986; 114. (rus).
18. Taubkin S.I. *Fire and explosion, features of their expertise*. Moscow, 1999; 600. (rus).
19. Kruglov E.Yu., Aseeva R.M. Flameless burning of wood: parameters of macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative decomposition. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):43-54. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54 (rus).
20. Tran H.C. Experimental data on wood materials. *Heat Release in Fires*. Chapter 11, part b. Babrauskas V., Grayson S.J. (Eds.). New York, Elsevier Applied Science, 1992; 357-372.
21. Tran H.C., White R.H. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and Materials.* 1992; 16:197-206.
22. Ohlemiller T.J. Smoldering combustion propagation on solid wood. *Fire Safety Sci*. 1991; 3:565-574.
23. Rein G. Smoldering combustion. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / Hurley M.J. (editor-in-chief). 5th ed. New York, NY, Springer, 2016; 581-603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19

24. Hadden R., Alkatib A., Rein G., Torero J.L. Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size. *Fire Technology*. 2014; 50(3):673-691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257
25. Kashiwagi T., Ohlemiller T.J., Werner K. Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine. *Combustion and Flame.* 1987; 69:331-345.
26. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B., Barbotko S.L., Kruglov E.Yu. Characteristics of heat release at burning of wood of different reeds and species. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 20(7):2-7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-teplovydeleniya-pri-gorenii-drevesiny-razlichnyh-porod-i-vidov (rus).
27. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 2014; 280. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
28. Volynskiy V.N. *Interrelation and variability of timber mechanical properties*. Arkhangelsk, 2006; 196. (rus).
29. Wichman I.S., Atreya A. Simplified model for the pyrolysis of charring materials. *Combustion and Flame*. 1987; 68:231-247.
30. Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D., Kent J.H. An integral model for the transient pyrolysis of solid materials. *Fire and Materials*. 1997; 21:7-16.

Поступила 05.07.2021, после доработки 16.08.2021;
принята к публикации 06.09.2021
Received July 5, 2021; Received in revised form August 16, 2021;
Accepted September 6, 2021

Информация об авторах

Евгений Юрьевич КРУГЛОВ, канд. техн. наук, научный сотрудник, Учебно-научный комплекс пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 766742; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Роза Михайловна АСЕЕВА, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Учебно-научный комплекс пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 43948; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgeniy Yu. KRUGLOV, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, 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: 766742; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Roza M. ASEEVA, Dr. Sci. (Chem.), Professor of Fire Safety in Construction Department, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, 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: 43948; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 42–57
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):42-57

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 519.841
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.42-57

Модель эффективности реагирования в иерархической системе управления по оценкам готовности пожарных подразделений

Николай Григорьевич Топольский[1], Станислав Юрьевич Бутузов[1], Валерий Яковлевич Вилисов[2]✉, Владимир Леонтьевич Семиков[1]

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

[2] Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова, Королев, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Готовность подсистем всех уровней в Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) к реагированию на чрезвычайные ситуации является одной из важнейших характеристик, определяющих ее эффективность. Для поддержки принятия решений на верхних уровнях иерархии управления важно иметь комплекс моделей, адекватно отражающих зависимости ключевых показателей эффективности реагирования от частных показателей нижележащих уровней системы (пожарно-спасательных подразделений). Нормативный подход к построению таких моделей, когда аналитики задают не только их структуру, но и параметры, в большинстве случаев оказывается малопродуктивным в силу неадаптивного их характера в условиях динамично изменяющихся внешних условий и технологических возможностей современных средств. Применение подхода, основанного на решении обратных задач, замыкающих контур обратной связи и обеспечивающих адаптивную подстройку не только параметров, но и структуры моделей, позволяет обеспечить текущую адекватность моделей в изменяющихся условиях.

Актуальность исследования заключается в разработке технологии построения полиномиальных моделей, позволяющих оценить эффективность реагирования в РСЧС на основании оценок показателей готовности подсистем нижних уровней, полученных с помощью экспертного оценивания (тестирования) средствами внутреннего контроля.

Цели и задачи. Целью работы являются построение и апробация технологии создания аналитических полиномиальных моделей, позволяющих адекватно оценивать показатели эффективности реагирования РСЧС в зависимости от показателей готовности подсистем нижних уровней (пожарно-спасательных подразделений). В соответствии с этой целью поставлены и задачи выбора типа модели и методов получения необходимых исходных данных.

Методы. В исследовании использованы методы анализа иерархически организованных систем, математическая статистика, имитационное моделирование, методы экспертного оценивания. Исследование основано на материалах отечественных и зарубежных публикаций.

Результаты и обсуждение. Предложенный метод построения модели эффективности функционирования РСЧС по данным о готовности подсистем дает основу для построения и моделей, учитывающих другие показатели подсистем.

Вывод. Представленные результаты решения задачи построения полиномиальной модели, отражающей зависимость эффективности реагирования РСЧС от показателей готовности нижних уровней, дают основание для построения и других подобных моделей для их использования в составе систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: риск; тестирование; внутренний контроль; экспертная оценка; регрессия; имитационное моделирование

Для цитирования: *Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я., Семиков В.Л.* Модель эффективности реагирования в иерархической системе управления по оценкам готовности пожарных подразделений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 42–57. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.42-57

✉ Вилисов Валерий Яковлевич, e-mail: vilisov@ut-mo.ru

© Н.Г. Топольский, С.Ю. Бутузов, В.Я. Вилисов, В.Л. Семиков, 2021

A model of response efficiency in the hierarchical control system based on the assessment of readiness of fire departments

Nikolay G. Topolsky[1], Stanislav Yu. Butuzov[1], Valeriy Ya. Vilisov[2]✉, Vladimir L. Semikov[1]

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

[2] Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The readiness of all levels of subsystems that comprise the Unified State System for Emergency Prevention and Liquidation (USSEPL) is one of the most important characteristics that determine its effectiveness. To support decision-making at the upper levels of the management hierarchy, it is important to have a set of models that adequately represent the dependence between key response efficiency indicators and particular indicators of lower levels of the system (fire and rescue departments). In most cases, a regulatory approach to the construction of such models, by virtue of which analysts set their structure and parameters, turns out to be unproductive due to their non-adaptive nature in the context of dynamically changing external conditions and technological capabilities of modern devices. The use of an approach based on solving inverse problems that close the feedback loop and provide for an adaptive adjustment of parameters and the structure of models, ensures the current adequacy of models amid changing conditions.

The relevance of the study lies in the development of a technology for constructing polynomial models that allow to assess the USSEPL response effectiveness based on estimated indicators of readiness of subsystems at lower levels obtained using expert evaluation techniques (testing) by means of internal control.

Goals and objectives. The aim of the work is to build and test the technology for developing analytical polynomial models that allow to adequately assess performance indicators of the USSEPL response depending on the readiness indicators of lower-level subsystems (fire and rescue departments). In compliance with this goal, the tasks of choosing the type of model and methods of obtaining the necessary initial data are also set.

Methods. The study uses methods of analysis of hierarchically organized systems, mathematical statistics, simulation modelling, and methods of expert evaluation. The research is backed by materials from domestic and foreign publications.

Results and discussion. The proposed method of constructing an efficiency model of the USSEPL operation, relying on the readiness of subsystems, serves as the basis for constructing models that can take into account other indicators of subsystems.

Conclusions. The solution to the problem of constructing a polynomial model, that features dependence between the USSEPL response efficiency and lower-level readiness indicators, serves as the basis for other similar models that will support decision making systems.

Keywords: risk; testing; internal control; expert evaluation; regression; simulation modeling

For citation: Topolsky N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya., Semikov V.L. A model of response efficiency in the hierarchical control system based on the assessment of readiness of fire departments. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):42-57. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.42-57 (rus).

✉ Valeriy Yakovlevich Vilisov, e-mail: vilisov@ut-mo.ru

Введение

Вопросы контроля готовности подразделений МЧС к выполнению задач ликвидации ЧС закреплены в нормативных правовых актах РФ, в частности, в постановлении Правительства РФ от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» отмечается: *«19. Готовность аварийно-спасательных служб к реагированию на ЧС проверяется в ходе проверок, осуществляемых в пределах своих полномочий МЧС, органами госнадзора и контроля, а также органами исполнительной власти …»*. В статье предложены методы и алгоритмы обеспечения технологических процедур внутреннего контроля готовности к реагированию на ЧС на различных уровнях иерархии управления. Предлагаемые в работе элементы технологии (методы и алгоритмы) внутреннего контроля основаны на риск-ориентированном подходе, позволяющем перейти от *управления по отклонениям* (выходных показателей от нормы) к *управлению по возмущениям* (факторов, влияющих на выходные показатели). Использование такого подхода требует применения моделей, увязывающих факторы с показателями.

Собянин С.С. в [1] в разделе «Планы и программы на 2019–2020 годы» отдельно указывает на «… внедрение риск-ориентированного подхода» как одного из направлений обеспечения пожарной безопасности столицы. Кроме того, он отмечает необходимость реализации внутреннего контроля состояния оборудования «…в период между инспекционными контролями».

Понятие риска в настоящее время широко используется для оценивания состояния организационных систем и последующего риск-ориентированного управления [2–7]. Одним из рабочих определений риска может быть следующее, предложенное Ф.Х. Найтом [2]: «Риск — это количественное значение неопределенности наступления некоторого события (фактора), вследствие которо-

го результаты деятельности организации могут отличаться от ожидаемых (плановых), как правило, в сторону ухудшения».

В контексте пожарной безопасности в ряде работ Н.Н. Брушлинского, С.В. Соколова и др. [5, 6] проанализировано понятие риска и развита концепция риска, в том числе, в составе триады «*опасность, риск, безопасность*», в соответствии с которой «*Риск — это количественная характеристика* возможности реализации конкретной опасности или ее последствий», а «*управление риском — это разработка комплекса мероприятий* (инженерно-технического, экономического, социального и иного характера), позволяющих снизить значение данного риска до допустимого уровня».

Основой риск-ориентированного подхода в организационных системах в настоящее время являются инструменты внутреннего контроля (ВК), принципы которого закреплены *Лимской декларацией руководящих принципов контроля*. Инструменты ВК [4] реализуются в системах ВК (СВК).

Во всех подходах, основанных на риск-ориентированном управлении, важным элементом является текущая количественная оценка риска того или иного типа (по отношению к соответствующей опасности). А поскольку разнообразия видов опасностей или рисковых событий (факторов неопределенности) для любой организации (или отдельной подсистемы того или иного уровня иерархии управления) существует много, то и совокупная (интегральная) оценка риска представляет собой некоторую свертку вектора оценок частных рисков [4].

В иерархически организованных системах управления важной является задача определения зависимости показателей функционирования системы в целом (ее верхнего уровня) от показателей подчиненных подсистем. В зависимости от значимости отдельных подсистем в общем эффекте их влияние может варьироваться от практически не значимых до значимых существенно. Одним из существенных показателей является готовность к выполнению поставленных перед системой задач. Значимость подсистем РСЧС может проявляться в результате ликвидаций ЧС.

Таким образом, актуальность организации и проведения внутреннего контроля текущего состояния сил и средств (СиС) пожарно-спасательных частей и системы управления ими на разных уровнях иерархии управления подтверждается нормативно-распорядительной документацией, развитием современных информационно-коммуникационных технологий, а также логикой развития современных систем управления, ориентирующихся все в большей степени на принципы проактивного, риск-ориентированного управления.

В работе в качестве базового инструмента оценивания рисков предложена система бинарных тестов, позволяющих тестировать подразделения пожарно-спасательных служб и сотрудников ГПС, а также различные уровни ФОИВ, входящих в состав РСЧС (согласно постановлению Правительства РФ от 30 декабря 2003 г. № 794), как источники событий, повышающих риски организации, а значит, и потенциально снижающих эффективность ее функционирования. Модельные исследования в работе без потери общности выполнены для двухуровневой системы РСЧС.

Таблица 1. Состав РСЧС. Резиденты и их функциональные подсистемы

Table 1. USSEPL composition. Residents and their functional subsystems

Резиденты (ФОИВ) РСЧС USSEPL (Federal executive authorities) residents	Функциональные подсистемы Functional subsystems
МВД РФ RF Ministry of Internal Affairs	1.1. Охраны общественного порядка 1.1. Public order enforcement
МЧС РФ RF Ministry of Emergency Situations	2.1. Мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций 2.1. Monitoring, laboratory control and emergency forecasting
	2.2. Предупреждения и тушения пожаров 2.2. Fire prevention and extinguishing
	2.3. Предупреждения и ликвидации ЧС на подводных потенциально опасных объектах во внутренних водах и территориальном море РФ 2.3. Prevention and liquidation of emergencies at potentially hazardous underwater facilities in inland waters and territorial seas of the RF
	2.4. Координации деятельности по поиску и спасанию людей во внутренних водах и территориальном море РФ 2.4. Coordination of activities on the search for and rescue of people in inland waters and territorial seas of the RF
МО РФ RF Ministry of Defense	3.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций Вооруженных Сил РФ 3.1. Prevention and liquidation of emergencies within the RF armed forces

Продолжение Табл. 1 / Continuation of the Table 1

Резиденты (ФОИВ) РСЧС USSEPL (Federal executive authorities) residents	Функциональные подсистемы Functional subsystems
Минздрав РФ RF Ministry of Healthcare	4.1. Всероссийской службы медицины катастроф 4.1. All-Russian Service of the Emergency Medicine
	4.2. Медико-санитарной помощи пострадавшим в ЧС в организациях (на объектах), находящихся в ведении ФМБА РФ, а также организациях и территориях, обслуживаемых ФМБА РФ 4.2. Medical and sanitary aid for victims of emergencies at organizations (facilities) controlled by the RF Federal Medical and Biological Agency (RFFMBA), as well as organizations and territories serviced by RFFMBA
	4.3. Резервов медицинских ресурсов 4.3. Reserves of medical resources
Минтруд РФ RF Ministry of Labour	5.1. Социальной защиты населения, пострадавшего от чрезвычайных ситуаций 5.1. Social security of the communities affected by emergencies
Минобрнауки РФ RF Ministry of Science and Higher Education	6.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в сфере деятельности Минобрнауки РФ 6.1. Prevention and liquidation of emergencies within the field of activities of the RF Ministry of Science and Higher Education
Минпросвещения РФ Ministry of Education	7.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в сфере деятельности Минпросвещения РФ 7.1. Prevention and liquidation of emergencies within the field of activities of the RF Ministry of Education
Минприроды РФ RF Ministry of Nature Protection	8.1. Противопаводковых мероприятий и безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в ведении Росводресурсов 8.1. Flood-prevention actions and safety of hydraulic engineering structures under the control of the Federal Water Resources Agency
	8.2. Мониторинга состояния недр (Роснедра) 8.2. Monitoring of subsoils (Federal Agency for Subsoil Usage)
	8.3. Наблюдения, оценки и прогноза опасных гидрометеорологических и гелиогеофизических явлений и загрязнения окружающей среды (Росгидромет) 8.3. Monitoring, assessment and forecasting of hazardous hydrometeorological and geliogeophysical phenomena and pollution of the environment
	8.4. Предупреждения о цунами (Росгидромет совместно с Геофизической службой РАН, МЧС РФ, Минкомсвязью РФ, администрациями субъектов РФ в Дальневосточном регионе) 8.4. Tsunami alerts (Russian Meteorological Service together with the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, RF Ministry of Emergencies, RF Ministry of Communications, administrations of the RF subjects in the Far-Eastern region
	8.5. Федерального государственного экологического надзора (Росприроднадзор) 8.5. Federal Supervisory Natural Resources Management Service (Federal Service for Supervision of Natural Resource Usage)
	8.6. Охраны лесов от пожаров и защиты их от вредителей и болезней леса (Рослесхоз) 8.6. Fire safety of forests, forest protection from pests and forest diseases (Federal Forestry Agency)
Минпромторг РФ RF Ministry of Industry and Trade	9.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах), находящихся в ведении Минпромторга РФ и Росстандарта 9.1. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (at facilities) controlled by the RF Ministry of Industry and Trade and the Federal Agency on Technical Regulation and Metrology
	9.2. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) оборонно-промышленного комплекса 9.2. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) of the military industrial complex
	9.3. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) гражданских отраслей промышленности 9.3. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) of civil branches of industry
	9.4. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) уничтожения химического оружия 9.4. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) responsible for destruction of chemical weapons

Продолжение Табл. 1 / Continuation of the Table 1

Резиденты (ФОИВ) РСЧС USSEPL (Federal executive authorities) residents	Функциональные подсистемы Functional subsystems
Минтранс РФ RF Ministry of Transport	10.1. Транспортного обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций 10.1. Transport services within the framework of liquidation of emergencies
	10.2. Организации и координации деятельности поисковых и аварийно-спасательных служб (как российских, так и иностранных) при поиске и спасании людей и судов, терпящих бедствие на море в поисково-спасательных районах РФ (Росморречфлот) 10.2. Organization and coordination of activities of rescue and emergency teams (both Russian and foreign) in the course of searching for and rescuing people and vessels in case of marine disasters within search and rescue regions of the RF (Federal Agency for Maritime and River Transport of Russia)
	10.3. Организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в море с судов и объектов независимо от их ведомственной и национальной принадлежности (Росморречфлот) 10.3. Organization of work on prevention and liquidation of crude oil and oil product spills from vessels and facilities irrespective of their affiliation and nationality (Federal Agency for Maritime and River Transport of Russia)
	10.4. Организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях с судов и объектов морского и речного транспорта (Росморречфлот) 10.4. Organization of work on prevention and liquidation of crude oil and oil product spills from vessels and facilities of marine and river transport (Federal Agency for Maritime and River Transport of Russia)
	10.5. Поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов гражданской авиации (Росавиация) 10.5. Search and emergency rescue services for civil aviation flights (Federal Air Transport Agency)
	10.6. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте (Росжелдор) 10.6. Prevention and liquidation of emergencies at railroad transport facilities (Federal Railway Transport Agency)
Минкомсвязь РФ RF Ministry of Communications	11.1. Информационно-технологической инфраструктуры 11.1. Information and technology infrastructure
	11.2. Электросвязи и почтовой связи 11.2. Electric and postal communications
Минсельхоз РФ RF Ministry of Agriculture	12.1. Защиты сельскохозяйственных животных 12.1. Protection of agricultural animals
	12.2. Защиты сельскохозяйственных растений 12.2. Protection of agricultural plants
	12.3. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах), находящихся в ведении и входящих в сферу деятельности Минсельхоза РФ 12.3.Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) under the control and within the scope of activities of the RF Ministry of Agriculture
	12.4. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах), находящихся в ведении или входящих в сферу деятельности Росрыболовства 12.4. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) under the control and within the scope of activities of the Federal Agency for Fishery
Минэкономразвития РФ RF Ministry of Economic Development	13.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в сфере деятельности Роспатента 13.1. Prevention and liquidation of emergencies within the scope of activities of the Russian Federal Service for Intellectual Property
Росатом State Atomic Energy Corporation	14.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах), находящихся в ведении и входящих в сферу деятельности Госкорпорации «Росатом» 14.1. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) under the control and within the scope of activities of the State Atomic Energy Corporation

Окончание Табл. 1 / End of the Table 1

Резиденты (ФОИВ) РСЧС USSEPL (Federal executive authorities) residents	Функциональные подсистемы Functional subsystems
Минэнерго РФ RF Ministry of Energy	15.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) топливно-энергетического комплекса и в организациях (на объектах), находящихся в ведении Минэнерго РФ 15.1. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) of the fuel and energy complex and within organizations (facilities) under the control of the RF Ministry of Energy
Ростехнадзор Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia	16.1. Контроля за ядерно- и радиационно опасными объектами 16.1. Control over nuclear and radiation hazardous facilities
	16.2. Контроля за химически опасными и взрывопожароопасными объектами 16.2. Control over chemically hazardous and fire explosive facilities
Роскосмос Russian Federal Space Agency	17.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и критически важных объектах, входящих в сферу деятельности Госкорпорации «Роскосмос» 17.1. Prevention and liquidation of emergencies at potentially hazardous and critically important facilities within the scope of activities of the Russian Federal Space Agency
Минстрой РФ RF Ministry of Construction, Housing and Utilities	18.1. Защиты городов, населенных пунктов от аварий, катастроф и стихийных бедствий 18.1. Protection of cities and settlements from accidents, emergencies and natural calamities
	18.2. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах), находящихся в ведении и входящих в сферу деятельности Минстроя РФ 18.2. Prevention and liquidation of emergencies within organizations (facilities) under the control and within the scope of activities of the RF Ministry of Construction, Housing and Utilities
Роспотребнадзор Russian Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare	19.1. Надзора за санитарно-эпидемиологической обстановкой 19.1. Oversight of the sanitary and epidemiological situation
Росгвардия Federal National Guard Troops Service	20.1. Предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций войск национальной гвардии РФ 20.1. Prevention and liquidation of emergencies within the troops of the Federal National Guard Troops Service
Росрезерв Russian Federal State Reserve Agency	21.1. Государственного материального резерва 21.1. State material reserve
ФСБ РФ RF Federal Security Service	22.1. Пограничной службы 22.1. Russian Federal Border Service

Структура системы

Согласно постановлению Правительства РФ от 30 декабря 2003 г. № 794 система реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) в РФ включает 21 федеральный орган исполнительной власти (ФОИВ) с их функциональными подсистемами (табл. 1). В состав ФОИВ для полноты анализа добавлена и Федеральная пограничная служба (входящая в состав ФСБ РФ), так как с учетом событий последнего времени (в частности, пандемии) актуальным становится перекрытие границ РФ для обеспечения, например, карантинных мероприятий.

Полная структура РСЧС приведена на рис. 1.

Эффективность реагирования РСЧС зависит не только от функциональных возможностей, ресурсов ведомств и их подсистем, но и от возникающих ЧС (внешние факторы).

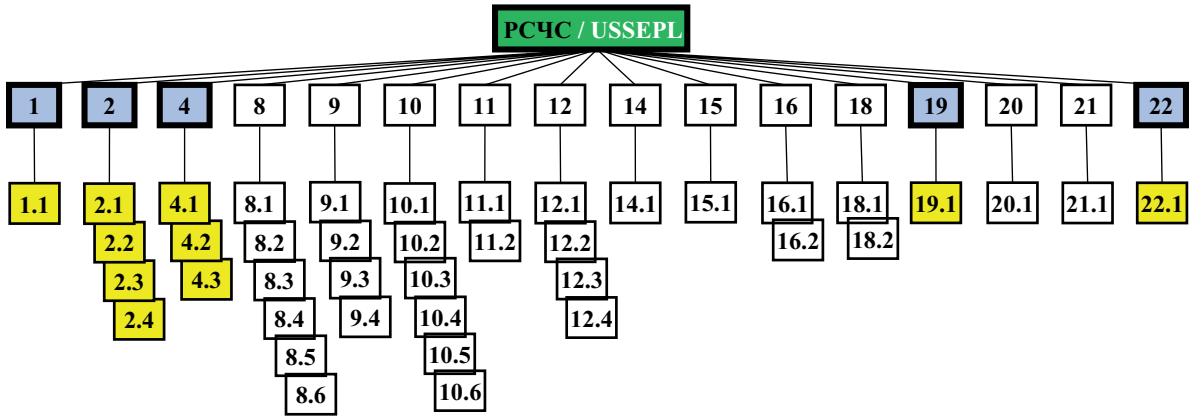


Рис. 1. Структура РСЧС для комплексного сценария

Fig. 1. The structure of the Unified State System for Emergency Prevention and Liquidation (USSEPL) for the purpose of a comprehensive scenario

Функционирование иерархической структуры РСЧС реализуется в ликвидации ЧС различных типов, определенных в нормативных документах. Основные разновидности ЧС объединены в следующие группы:

- пожары в городской и сельской местности, в лесах (по всей территории РФ) с интенсивностью, соответствующей типовой статистике;
- аварии и катастрофы техногенного и природного характера (на АЭС, ГЭС, на крупных производствах и на оборонных объектах и т.п.) различных масштабов;
- паводки весной и при обильных дождях в паводкоопасных районах РФ;
- эпидемии в отдельных регионах РФ и пандемии;
- ЧС во внутренних и внешних акваториях РФ.

На «вход» РСЧС информация о ситуациях этих типов поступает для «обработки» как смесь информационных потоков. При этом РСЧС выступает в роли системы массового обслуживания (СМО), обладающей определенной (не безграничной) пропускной способностью. И в зависимости от локальной интенсивности этих потоков ресурсы подсистем, подразделений могут обладать различной степенью готовности к выполнению очередных боевых задач. Но с учетом того, существенна ли готовность конкретной подсистемы (подразделения) в общей структуре управления при решении задач определенного типа, может определяться и общая готовность РСЧС к выполнению боевых задач. Эти зависимости и являются предметом рассмотрения в данной работе.

Предполагается, что на нижних уровнях иерархии управления (в пожарно-спасательных частях, гарнизонах и т.п.), как и в других аналогичных организационных структурах [4], в соответствии с нормативными требованиями производится регулярный мониторинг готовности различных сторон их деятельности.

Данные тестирования могут обрабатываться с различной степенью централизации.

Варианты межуровневого взаимодействия

Основные виды межуровневого взаимодействия определяются вариантами структуры организации. Наиболее существенными являются:

- **информационная структура**, отражающая потоки информации о состоянии (в рассматриваемом случае — готовности ПСЧ к реагированию) тех или иных сторон операционной деятельности, информацию, возникающую в процессе мониторинга и направляемую снизу-вверх;
- **управленческая структура**, отражающая потоки управленческо-распорядительных данных, направляемых сверху вниз для исполнения (тесты, планы проверок, распоряжения по устранению последствий нарушений, их потенциальных причин и др.).

Из числа алгоритмических модулей, исполняемых в различных подразделениях как верхнего, так и нижних уровней (в контексте организации внутреннего контроля), можно выделить основные.

1. Формирование тестов (выбор репрезентативных показателей).

2. Тестирование (сбор данных от экспертов и автоматических процедур о состоянии ВК, операционной деятельности подведомственной организации ПВО).

3. Проверки операционной деятельности ПВО, выполняемые:

3.1. Внешними органами;

3.2. В рамках внутренних инспекций службами организации;

3.3. Как внутренние проверки в рамках плана работы СВК ПВО.

4. Выявление источников нарушений:

4.1. По результатам тестирования (мониторинга);

4.2. По результатам внешних проверок.

5. Устранение последствий нарушений и/или предотвращение возможных нарушений.

Каждый из модулей (с учетом их модификаций, приведенных в подпунктах) может быть реализован на верхнем уровне в вышестоящей организации (ВСО), на нижних (ПВО) и распределен между ними. Поэтому их сочетание дает большое разнообразие возможных вариантов размещения модулей на уровнях иерархических структур организаций, а значит, и существенное разнообразие вариантов их взаимодействия.

Приведенные на рис. 2 варианты межуровневого взаимодействия в виде функционально-алгоритмических модулей отражают первую из трех наиболее существенных вариантов структуру организации обработки результатов ВК:

1) полностью *централизованную*, в которой на нижнем уровне (ПВО) выполняется лишь тестирование, а вся обработка его результатов проводится на верхнем уровне (в ВСО). В таком распределении функций минимизируется возможность преднамеренного искажения конечных показателей тестирования, свойственного большинству организационных систем, являющегося проявлением их активности по В.Н. Буркову [8];

2) *децентрализованную*, в которой все контрольные функции переданы на уровень ПВО, где выполняются тестирование и обработка его результатов;

3) *переходную* — частично децентрализованную с передачей части контрольных функций на уровень ПВО.

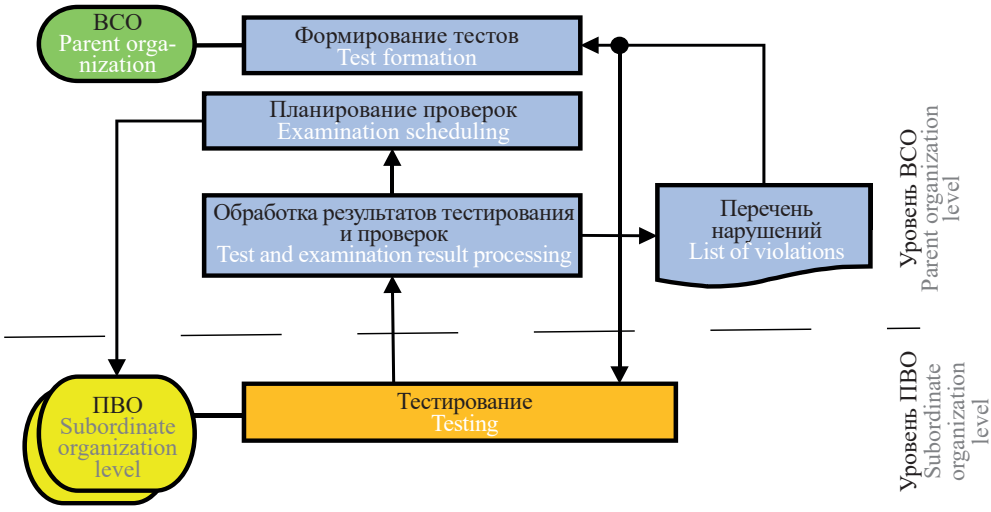


Рис. 2. Централизованный вариант тестирования и проверок

Fig. 2. A centralized testing and examination option

Таблица 2. Показатели готовности подсистем в ЧС

Table 2. Indicators of readiness of subsystems in case of emergency

ЧС EMERGENCY	Подсистемы (резиденты) Subsystems (residents)																						РСЧС USSEPL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
ЧС 1 EMERGENCY 1	0,5	0,7		0,8		0,3		0,7	0,9		0,6				0,7			0,8	0,6		0,8	0,7	0,785
ЧС 2 EMERGENCY 2	0,7	0,9		0,7					0,6	0,5	0,8	0,7		0,6		0,6			0,9	0,8	0,7	0,6	0,896
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ЧС *n* EMERGENCY *n*	0,6	0,4		0,9				0,7	0,8	0,4	0,9	0,9	0,7		0,8	0,5	0,8	0,8	0,7	0,6	0,7	0,9	0,778

В табл. 2 приведен гипотетический пример, в котором наблюдаются n ЧС, относящихся к одной из групп ЧС (или к некоторой их подгруппе), приведенных выше. В этой группе ЧС (например, в пожарах в крупных зданиях) участвуют подсистемы 1, 2, 4, 19, 22. Значения, приведенные в табл. 2, соответствуют текущим показателям готовности, полученным от подведомственных подсистем.

Постановка задачи

Целью исследования является построение модели, отражающей важность вклада готовности каждой из подсистем РСЧС в интегральную эффективность реагирования системы (РСЧС) при возникающих ЧС.

Эффективность РСЧС как сложной многоуровневой системы описывается множеством показателей, отражающих различные стороны ее функционирования [5–7, 9, 10]. Однако для вышестоящих уровней управления важным является наличие некоторого обобщенного показателя, объединяющего в себе множество частных показателей.

Предполагается, что на уровне ПВО (см. рис. 1) имеется возможность оценивания показателей готовности соответствующих подсистем с помощью методов экспертных оценок, которые могут быть реализованы в виде интерактивных тестов, фрагмент примера одного из которых приведен в табл. 3.

Интегральный показатель, вычисляемый по тесту для отдельного подведомственного звена системы, имеет вид [4]:

$$x_g = \sum_{i=1}^{I_g} \mu_{gi} s_{gi}, \qquad (1)$$

где i — номер показателя в g-ном тесте (или g-ной ПВО);

I_g— число показателей в g-ном тесте;

s_{gi} — значение ответа на вопрос по i-му показателю в g-ном тесте;

μ_{gi} — весовой коэффициент i-го показателя в g-ном тесте; для всех весовых коэффициентов должно выполняться условие нормировки: $\sum_{i=1}^{I_g} \mu_{gi} = 1$.

Подобные тесты могут выполняться непосредственно компетентным лицом, уполномоченным давать текущие оценки s_{gi} и/или соответствующие им веса μ_{gi}. Оценки могут быть получены и с использованием методов парных сравнений [11], позволяющих получить максимально надежные индивидуальные оценки. При этом для еще большего повышения надежности оценок может быть использована и групповая экспертиза. Однако организация экспертизы на самом нижнем (первичном) уровне иерархии управления не является предметом рассмотрения в данной работе. Здесь будем считать, что необходимые оценки на самом нижнем уровне иерархии управления (в ПВО) получены. Тогда для вышестоящей организации (ВСО) возникает задача оценивания эффективности (y) реагирования на текущую ЧС всей иерархией управления. Если бы существовала функциональная зависимость показателя y от показателей готовности ПВО, то ее можно было представить без потери общности в следующей полиномиальной по переменным (x…) и линейной по параметрам (γ_g, γ_{gh}, …) форме:

$$y = \sum_{g=1}^{G} \gamma_g x_g + \sum_{g=1}^{G} \sum_{h=1}^{H} \gamma_{gh} x_g x_h + \ldots, \qquad (2)$$

где индексы g, h … имеют смысл номера ПВО.

Априори задать такую зависимость (степень полинома и коэффициенты γ_g, γ_{gh}, …), исходя

Таблица 3. Показатели, характеризующие состояние сил и средств МЧС РФ (тест № g)

Table 3. Indicators that characterize the state of forces and resources of the RF Ministry of Emergencies (Test No. g)

№ No. ($i = 1, \ldots, I_g$)	Тестовые вопросы Test questions	Значение s_{gi} Value s_{gi}	Вес μ_{gi} Weight μ_{gi}
1	Доля пожарно-спасательного оборудования, находящегося в состоянии полной готовности (от 0 до 1) The share of the fire and rescue equipment in the state of full alert	s_{g1}	μ_{g1}
2	Текущий уровень профессиональной подготовленности личного состава (от 0 до 1) Current level of professional preparedness of the staff	s_{g2}	μ_{g2}
…	…	…	…
I_g	Текущее состояние транспортной инфраструктуры закрепленного за подразделением региона (от 0 до 1) Current state of the transport infrastructure in the region within the scope of responsibility of the subdivision (0 to 1)	$s_g I_g$	$\mu_g I_g$
Итоговый показатель по тесту: Total test value:		x_g	

из тех или иных нормативных соображений, обычно не представляется возможным.

Выражение (2) отражает постановку *прямой задачи* оценивания эффективности ликвидации очередной ЧС по показателям готовности ПВО. В выражении (2) неизвестными являются весовые коэффициенты γ_g, γ_{gh}, … . Как показывают исследования [12, 13], ЛПР, как эксперт, может с приемлемой точностью давать экспертные оценки *лишь привычным ему объектам*, в данной задаче — независимым и зависимым переменным (s_{gi} и y), а не весам важности μ_{gi}, γ_g, γ_{gh}, … .

Поэтому для того, чтобы воспользоваться выражением (2) для получения прогнозного значения эффективности ликвидации ЧС по экспертным оценкам готовности, поступившим от нижнего уровня, предлагается решить *обратную задачу* — по выборке объемом K наблюдений, состоящим из оценок интегральных показателей эффективности реагирования $\{y\}$, полученным от экспертов (ЛПР ВСО), и оценок $\{x_g\}$, полученных от ПВО, построить оценки весовых коэффициентов γ_g, γ_{gh}, … . Таким образом, обратная задача замыкает контур обратной связи, обеспечивающий текущую адекватность модели (2), которая может быть использована для прогнозирования эффективности ликвидации очередной ЧС на основании текущих оценок готовности ПВО x… . Модель (2) может быть использована в составе систем поддержки принятия решений в РСЧС для обеспечения необходимого уровня эффективности реагирования на ЧС.

Модельный пример

Рассматриваемая обратная задача относится к классу задач ретроспективной идентификации параметров модели при заданной ее структуре, поэтому можно воспользоваться инструментарием регрессионного анализа [14].

Имитационное моделирование выполнено для сокращенной структуры РСЧС, представленной на рис. 1, в которой участвуют лишь функциональные подсистемы 1, 2, 4, 19, 22 (тонированы на рис. 1). Такая сокращенная структура характерна для сценариев ЧС (например, пандемия), в которых максимальная нагрузка приходится на Минздрав, но кроме того, в качестве обеспечивающих участвуют МВД (для соблюдения режима), МЧС, Роспотребнадзор (РПН) — для тестирования населения и Госпогранслужба (ФСБ) для соблюдения пропускных режимов на границах.

Для построения модели взаимосвязи показателей готовности уровней без потери общности рассмотрено взаимодействие двух верхних уровней (см. рис. 1), где ВСО — это самый верхний уровень РСЧС, а ПВО — это министерства и ведомства, подчиненные ему непосредственно. В имитационном эксперименте рассматривается лишь линейная (по переменным) форма модели (2). Модельные значения весовых коэффициентов γ_g приняты соответственно (в форме транспонированного вектора):

$$\gamma = [0{,}1\ 0{,}2\ 0{,}4\ 0{,}1\ 0{,}2]^T. \quad (3)$$

Эти значения и предстоит оценить в процессе решения обратной задачи. В ходе имитации были сгенерированы показатели готовности нижних уровней, имитирующие тестирование готовности к ликвидации очередной ЧС соответствующих ПВО, а также экспертные оценки интегральной эффективности верхнего уровня (т.е. системы в целом) по версии экспертов верхнего уровня. Объем выборки в имитационном эксперименте составил $K = 50$ наблюдений. В табл. 4 приведен фрагмент выборки наблюдений.

Значения в табл. 4 сгенерированы в соответствии с β-распределением, плотность распределения которого имеет вид:

$$f(\alpha,\beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha,\beta)}, \quad (4)$$

где $B(\alpha,\beta)$ — β-функция вида:

$$B(\alpha,\beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}\,dx, \quad (5)$$

Таблица 4. Фрагмент выборки наблюдений

Table 4. Observation sampling fragment

Номер набл. Observation No.	МВД Ministry of Internal Affairs	МЧС Ministry of Emergencies	МЗ Ministry of Healthcare	РПН Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare	ФСБ Federal Security Service	РСЧС USSEPL
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	0,244	0,570	0,706	0,536	0,924	0,665
2	0,235	0,417	0,410	0,515	0,794	0,486
…	…	…	…	…	…	…
50	0,492	0,483	0,597	0,330	0,933	0,602

$$m_x = \frac{\alpha}{\alpha+\beta};\ D_x = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)}. \qquad (6)$$

При имитации все ПВО разбиты на три группы в зависимости от типов ЧС, в которых они участвуют. При этом, чем в большем количестве типов ЧС одновременно участвует ПВО, тем меньшее среднее значение имеет его β-распределение (в силу ограниченности ресурсов). При моделировании параметры α и β для β-распределений этих трех групп ПВО были заданы соответственно следующими (5; 5), (10; 5), (30; 5). Графики их плотностей распределения приведены на рис. 3.

Математические ожидания и среднеквадратические отклонения (m_x; σ_x) этих трех распределений имеют следующие значения соответственно: (0,50; 0,15), (0,67; 0,12), (0,86; 0,06). Гистограмма имитированных (в среде MS Excel) β-распределенных случайных величин для всех ПВО самого нижнего уровня иерархической системы (по выборкам объемом 1000 наблюдений для каждой) приведена на рис. 4. Фрагмент этих выборок и представлен в колонках x_1, …, x_5 табл. 4.

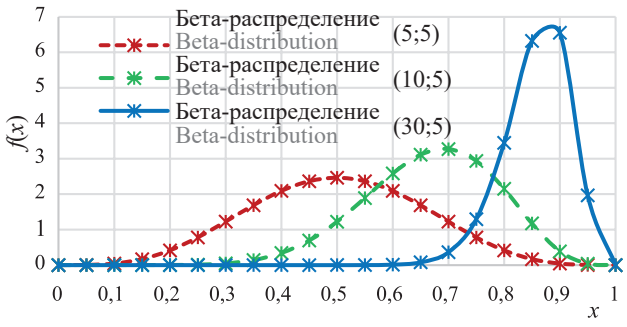


Рис. 3. Плотности распределения оценок показателей трех категорий ПВО

Fig. 3. Distribution density for indicator assessments of three categories of subordinate organizations

Значения выходных показателей (y) выборки вычислены в соответствии с выражением (2), для линейной его части, и принятыми модельными значениями весовых коэффициентов γ_g. Гистограмма величин оценок показателей y (объемом 1000 значений, соответствующих входным x_i) представлена на рис. 5.

Там же, на рис. 5, приведена и аппроксимация выходных величин в виде гауссова распределения, построенная с помощью метода наименьших квадратов и нормализованная. Как видно из рис. 5, нормальное распределение достаточно хорошо описывает значения случайных величин на верхнем уровне иерархии (ВСО – РСЧС). Это объясняется известным из математической статистики [14–16] свойством нормализации суммы произвольно распределенных случайных величин. В данном примере это свойство проявляется уже для пяти взвешенных β-распределенных случайных величин.

Для дальнейшего решения поставленной обратной задачи была использована не вся выборка в 1000 наблюдений, а лишь 50 из них. Минимально приемлемый для практических приложений объем выборки в данной работе не определялся, так как требует большого объема статистических испытаний и может служить темой отдельного исследования.

Регрессионный анализ

Для построения модели, связывающей наблюдаемые входные значения x_i и отклик на них (y), был проведен регрессионный анализ (в среде MS Excel) по выборке переменного объема (от 1 до 50). Результаты анализа в виде диаграммы приведены на рис. 6, где в зависимости от объема выборки (шаги наблюдений) показана сходимость значений искомых оценок («Вес ПС i» — веса пяти подсистем, участву-

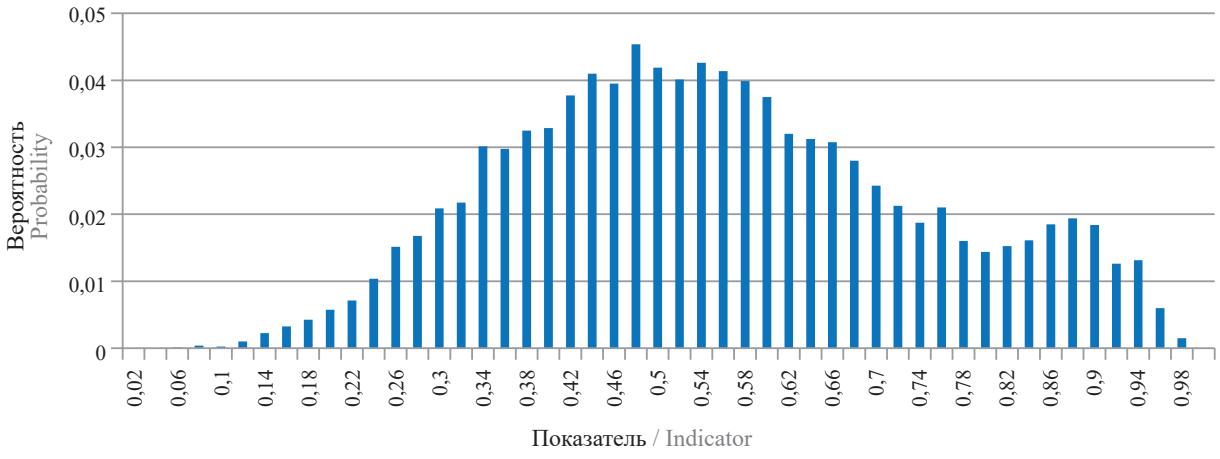


Рис. 4. Гистограмма β-распределенных значений оценок x_i показателей пяти моделируемых подсистем

Fig. 4. A histogram of β-distributed values of x_i assessments of indicators for five simulated subsystems

ющих в моделировании) к их модельным значениям («Мод. вес *i*»).

Кроме того, на рис. 6 приведены графики погрешности прогнозирования на основе регрессионной модели с текущими значениями оценок весов (коэффициентов модели) и значения коэффициента детерминации (R^2) модели («R^2»).

Погрешность вычислялась как абсолютное значение разности между прогнозным значением, построенным по текущей регрессионной модели, и значением отклика (y) текущего шага выборки. Видно, что прогностические свойства модели достаточно высокие, начиная уже с пятого шага, и остаются в среднем около 5 % до конца наблюдений.

Значения коэффициентов регрессии также сходятся быстро и становятся достаточно стабильными уже с пятого шага, приближаясь к своим модельным значениям.

Значения коэффициента детерминации стабилизируются примерно с 35-го шага и остаются на уровне около значения $R^2 = 0{,}992$. Это значение обычно интерпретируется как то, что 99,2 % выборки можно объяснить с помощью построенной модели.

Итоговое уравнение регрессии с искомыми коэффициентами как весами γ_g, отражающими вклад

Рис. 5. Гистограмма значений выходных оценок *y* и ее гауссова аппроксимация

Fig. 5. A histogram of values of outgoing *y* assessments and its Gauss approximation

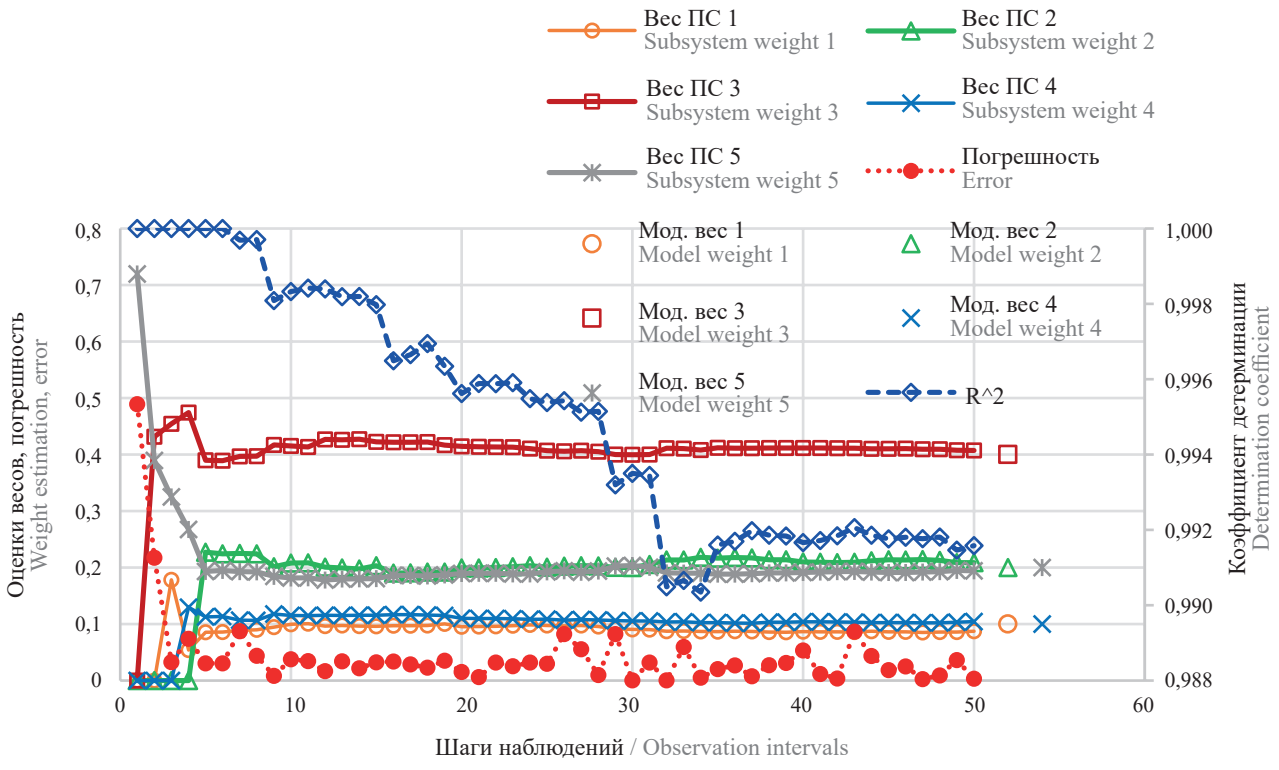


Рис. 6. Результаты регрессионного анализа с переменным объемом выборки

Fig. 6. Results of the regressive analysis with a variable scope of sampling

подсистем в общий эффект на уровне ВСО (РСЧС), и как результат решения обратной задачи, имеет вид:

$$y = 0{,}087x_1 + 0{,}209x_2 + 0{,}407x_3 + 0{,}104x_4 + 0{,}194x_5. \quad (7)$$

Еще одной (кроме коэффициента детерминации) мерой близости полученной оценки к истинной (модельной, фактической) может служить относительная длина вектора разности векторов оценок и модели [14, 15]. Обе эти меры могут быть использованы для построения правила остановки итерационного процесса оценивания коэффициентов модели.

Это уравнение в дальнейшем может быть использовано и для решения прямой задачи (для рассматриваемого сценария) — оценивания показателя готовности на уровне РСЧС по показателям, полученным от нижележащих подсистем (ПВО). При этом уже не потребуется участие экспертов для определения весовых коэффициентов значимости той или иной подсистемы в общем эффекте, необходимо будет лишь тестировать звенья нижнего уровня.

В тех случаях, когда вычисленный таким образом показатель будет представляться его использующему ЛПР недостаточно адекватным, данное мнение ЛПР, как эксперта, может быть учтено для коррекции весов (этот алгоритм в работе не рассматривается) или для обновления весов описанная выше процедура может быть проделана вновь.

Обсуждение результатов

1. В работе рассмотрен лишь статический режим оценивания, позволяющий рассмотреть отдельные временные срезы. В дальнейших исследованиях важным представляется рассмотрение процессов в динамике их возникновения, а также их влияние на распределяемые общие ресурсы, которые могут оказаться в дефиците на отдельных интервалах времени. Важными представляются и вопросы динамики восстановления пополняемых (возобновляемых) ресурсов и оптимального распределения ограниченных финансовых средств при возникновении дефицита.

2. Поскольку на эффективность модели существенное влияние оказывает адекватность ее реальным процессам, то важной стороной модели должно стать представление в ней реальных динамических процессов развития ситуации. Один из подходов на этом пути может состоять в том, что предложенную в работе статическую модель можно использовать как ряд вариантов с различными текущими значениями параметров используемых ресурсов (см. табл. 2).

3. Предложенная настраиваемая полиномиальная модель (2) может служить основой для построения экспертной системы, необходимой для мониторинга и управления силами и средствами при ликвидации сложных ЧС. Предложенная структура модели позволяет выполнить декомпозицию комплексного показателя эффективности и выявить те ведомства и их конкретные функциональные подсистемы, которые являются критическими звеньями в РСЧС на текущий момент времени.

4. Включение в состав РСЧС и тех резидентов, которые отражают экономические процессы в стране и мире (Минфин, Минэкономразвития и др.), позволит более комплексно оценивать складывающиеся ситуации, выявлять корреляционные связи различных социальных, экономических, техногенных и других процессов и прогнозировать ситуации в одних сферах по процессам, протекающим в других.

5. Для практического применения предложенных в работе моделей желательно знать и обоснованно предлагать минимальный объем выборки для решения обратной задачи оценивания весов, так как выборка отклика (выходные значения) строится в виде результатов экспертного оценивания, проводимого с привлечением квалифицированных экспертов. В данной работе минимально приемлемый для практического использования объем выборки не исследовался, это может служить темой отдельного исследования.

6. Представление интегрального показателя реагирования в виде квазинормального распределения (см. рис. 5) позволяет использовать его для поддержки принятия решений [7, 17–20] не только в виде оценки среднего значения, но и в виде квантильных оценок, обеспечивающих требуемый уровень доверительной вероятности.

Выводы

В современных условиях дестабилизирующие и деструктивные факторы становятся все более разнообразными и динамичными. Все чаще возникают ситуации их комплексного воздействия на процессы и объекты в стране. Это предъявляет и новые требования к системам экстренного реагирования на чрезвычайные ситуации. Большее значение должно уделяться средствам мониторинга и проактивного управления для обеспечения приемлемого уровня безопасности. И хотя случайный характер возникновения ЧС не дает возможности предусмотреть все возможные варианты, наличие адекватных инструментальных средств поддержки принятия решений может позволить минимизировать возможный ущерб.

Предложенный подход к построению модели оценивания эффективности реагирования иерархической системы по показателям готовности нижних уровней иерархии управления может служить основой для построения моделей прогнозирования эффективности реагирования. Модельные расчеты показали работоспособность такой модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Собянин С.С.* Московское правительство о пожарной безопасности в столице в 2018–2019 гг. // Каталог «Пожарная безопасность». 2019. URL: http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v (дата обращения 07.03.2021).
2. *Найт Ф.Х.* Риск, неопределенность и прибыль. М. : Дело, 2003. 360 с.
3. *Брушлинский Н.Н., Шебеко Ю.Н., Болодьян И.А., Вагнер П., Глуховенко Ю.М., Гилетич А.Н. и др.* Пожарные риски: динамика, управление, прогнозирование / под ред. Н.Н. Брушлинского, Ю.Н. Шебеко. М. : ВНИИПО, 2007. 370 с.
4. *Vilisov V.Ya.* Internal control tools used within hierarchical organizational structures // 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow : IEEE Publ., 2017. С. 1–5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109705 URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/8109705/ (дата обращения 07.03.2021).
5. *Lee H.-R., Lee T.* Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 291. Issue 1. Pp. 296–308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018
6. *Брушлинский Н.Н., Клепко Е.А., Попков С.Ю., Соколов С.В.* Управление пожарной безопасностью субъектов Российской Федерации на основе анализа пожарных рисков // Проблемы пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. № 3. С. 104–114. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15121574
7. *Бедило М.В., Бутузов С.Ю., Прус Ю.В., Рыженко А.А., Чурсин Р.Г.* Модель адаптивного управления оперативными службами РСЧС в чрезвычайных ситуациях межрегионального и федерального уровня // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1 (71).
8. *Овсяник А.И., Копнышев С.Л., Бурков В.Н., Щепкин А.В.* О методике исследования достаточности мероприятий по обеспечению безопасности функционирования региона страны // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 2 (72). URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf (дата обращения 07.03.2021).
9. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К.* Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития. М. : Наука, 1993. 160 с.
10. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.
11. *Орлов А.И.* Организационно-экономическое моделирование. Экспертные оценки. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 486 с.
12. *Ларичев О.И., Мошкович Е.М.* О возможностях получения от человека непротиворечивых оценок многомерных альтернатив // Дескриптивный подход к изучению процессов принятия решений при многих критериях : сб. тр. Вып. 9. М. : ВНИИСИ, 1980. С. 3–26.
13. *Петровский А.Б.* Теория принятия решений. М. : Издательский центр «Академия», 2009. 400 с.
14. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ / пер. с англ. В.П. Носко. М. : Мир, 1980. 456 с.
15. *Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E.* Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1605.02561 (дата обращения 07.03.2021).
16. *Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M.* Breath activity detection algorithm. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1602.07767 (дата обращения 07.03.2021).
17. *Zhang X., Mahadevan S.* Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment // Decision Support Systems. 2020. Vol. 131. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014 (дата обращения 07.03.2021).
18. *Taha H.A.* Operations research: an introduction. 10th Global ed. Harlow (England): Pearson Education Limited, 2017. 848 p.
19. *Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F.* A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
20. *Cavdur F., Sebatli A.* A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. Vol. 127. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113145

REFERENCES

1. Sobyanin S.S. Moscow government on fire safety in the capital in 2018-2019. *Fire safety catalog*. 2019. URL: http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v (Accessed: March 7, 2021). (rus).
2. Nayt F.Kh. *Risk, uncertainty and reward*. Moscow, Delo Publ., 2003; 360. (rus).
3. Brushlinsky N.N., Shebeko Yu.N., Bolodyap I.A., Wagner P., Glukhovenko Yu.M., Giletich A.N. et al. *Fire risks: dynamics, management, forecasting*. Moscow, VNIIPO, 2007; 370. (rus).
4. Vilisov V.Ya. Internal control tools used within hierarchical organizational structures. *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. Moscow, IEEE Publ., 2017; 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109705 URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/8109705/ (Accessed: March 7, 2021).
5. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *European Journal of Operational Research*. 2021; 291(1):296-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018.
6. Brushlinskiy N.N., Klepko Ye.A., Popkov S.Yu., Sokolov S.V. Fire safety management of the constituent entities of the Russian Federation based on the analysis of fire risks. *Problemy pozharnoy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy/Fire safety and emergency problems*. 2010; 3:104-114. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15121574 (rus).
7. Bedilo M.V., Butuzov S.Yu., Prus Yu.V., Ryzhenko A.A., Chursin R.G. The model of adaptive management of operational services of RSChS in emergency situations of interregional and federal level. *Technology of Technosphere Safety*. 2017, no. 1(71). (rus).
8. Ovsyanik A.I., Kopnyshev S.L., Burkov V.N., Shchepkin A.V. The research methodology of sufficiency measures to ensure the safety functioning of the region. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 2(72). URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf (Accessed: March 7, 2021). (rus).
9. Tsvirkun A.D., Akinfiyev V.K. *The structure of multilevel and large-scale systems. Synthesis and development planning.* Moscow, Nauka Publ., 1993; 160. (rus).
10. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Theory of hierarchical multilevel systems*. Moscow, Mir Publ., 1973; 344. (rus).
11. Orlov A.I. *Organizational and economic modeling. Expert assessments*. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2011; 486. (rus).
12. Larichev O.I., Moshkovich E.M. On the possibilities of obtaining from a person consistent estimates of multidimensional alternatives. *Descriptive approach to the study of decision-making processes under many criteria.* Issue 9. Moscow, VNIISI, 1980; 3-26. (rus).
13. Petrovskiy A.B. *Decision theory*. Moscow, Akademiya Publ., 2009; 400. (rus).
14. Seber J.A.F. *Linear regression analysis*. New York, 1977; 465.
15. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. *Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety*. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1605.02561 (Accessed: March 7, 2021).
16. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. *Breath activity detection algorithm*. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1602.07767 (Accessed: March 7, 2021).
17. Zhang X., Mahadevan S. Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment. *Decision Support Systems*. 2020; 131. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014 (Accessed: March 7, 2021).
18. Taha H.A. *Operations research: An introduction*. 10th Global ed., Harlow (England), Pearson Education Limited, 2017; 848.
19. Fertier A., Barthe-Delanoë A-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
20. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145

Поступила 28.06.2021, после доработки 27.07.2021;
принята к публикации 04.08.2021
Received June 28, 2021; Received in revised form July 27, 2021;
Accepted August 4, 2021

Информация об авторах

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

БУТУЗОВ Станислав Юрьевич, д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 283236; ORCID: 0000-0003-0465-1903; e-mail: S.Butuzov@academygps.ru

ВИЛИСОВ Валерий Яковлевич, д-р эконом. наук, канд. техн. наук, профессор кафедры математики и естественно-научных дисциплин, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Россия, 141070, г. Королёв, ул. Гагарина, 42; РИНЦ ID: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; Researcher ID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593;e-mail: vilisov@ut-mo.ru

СЕМИКОВ Владимир Леонтьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры управления и экономики ГПС, 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: 432977; ORCID: 0000-0001-6870-0562; e-mail: vlsemikov37@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolay G. Topolsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, 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: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

Stanislav Yu. BUTUZOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor; Professor of Department of Information Technology, 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: 283236; ORCID: 0000-0003-0465-1903; e-mail: S.Butuzov@academygps.ru

Valeriy Ya. VILISOV, Dr. Sci. (Econom.), Cand. Sci. (Eng.), Professor of Department of Mathematics and Natural Sciences, Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov, Gagarin St., 42, Korolev, 141070, Russian Federation; ID RISC: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; Researcher ID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vilisov@ut-mo.ru

Vladimir L. SEMIKOV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation; Professor of Department of Management and Economics of the State Fire Service, 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: 432977; ORCID: 0000-0001-6870-0562; e-mail: vlsemikov37@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 58–65
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):58-65
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 614.841
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65

Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре

Алексей Юрьевич Шебеко, Юрий Николаевич Шебеко✉, Андрей Владимирович Зубань

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время стандартом ГОСТ Р 12.3.047–2012 регламентирована методика определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанная на сравнении значений предела огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожара. Однако на практике реализуются ситуации, когда при отсутствии нормативных требований по огнестойкости собственник объекта из экономических соображений готов примириться с потерей своего объекта, снизив требуемые пределы огнестойкости, которые могут быть рассчитаны в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047–2012. В этом случае следует, задавшись вероятностями безопасной эвакуации или спасения, сравнивать распределения, с одной стороны, пределов огнестойкости и, с другой стороны, времени эвакуации или спасения.
Методология определения требуемых пределов огнестойкости. Апробирован на примере реальной технологической этажерки предложенный ранее в работе [1] вероятностный метод определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, отличный от приведенного в ГОСТ Р 12.3.047–2012. Метод основан на сравнении распределений таких случайных величин, как расчетное время эвакуации и спасения людей при пожаре на производственном объекте и пределов огнестойкости строительных конструкций.
Расчет требуемых пределов огнестойкости. Представлен пример применения предложенного метода для случая спасения людей, основанный на выполненных полномасштабных экспериментах на реальной технологической этажерке газоперерабатывающего завода [2].
Выводы. Определены требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок одного газоперерабатывающего завода, учитывающие время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций, на основе экспериментального определения времени эвакуации и спасения персонала с указанных этажерок при пожаре.

Ключевые слова: надежность строительных конструкций; вероятностный подход; времена эвакуации и спасения; дисперсия величины предела огнестойкости; огнезащита

Для цитирования: *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В.* Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 58–65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65

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

The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire

Aleksey Yu. Shebeko, Yury N. Shebeko✉, Andrey V. Zuban

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

ABSTRACT

Introduction. GOST R 12.3.047-2012 standard offers a methodology for determination of required fire resistance limits of engineering structures. This methodology is based on a comparison of values of the fire resistance

© А.Ю. Шебеко, Ю.Н. Шебеко, А.В. Зубань, 2021

limit and the equivalent fire duration. However, in practice incidents occur when, in absence of regulatory fire resistance requirements, a facility owner, who has relaxed the fire resistance requirements prescribed by GOST R 12.3.047–2012, is ready to accept its potential loss in fire for economic reasons. In this case, one can apply the probability of safe evacuation and rescue to compare distributions of fire resistance limits, on the one hand, and evacuation and rescue time, on the other hand.

A methodology for the identification of required fire resistance limits. The probabilistic method for the identification of required fire resistance limits, published in work [1], was tested in this study. This method differs from the one specified in GOST R 12.3.047-2012. The method is based on a comparison of distributions of such random values, as the estimated time of evacuation or rescue in case of fire at a production facility and fire resistance limits for engineering structures.

Calculations of required fire resistance limits. This article presents a case of application of the proposed method to the rescue of people using the results of full-scale experiments, involving a real pipe rack at a gas processing plant [2].

Conclusions. The required fire resistance limits for pipe rack structures of a gas processing plant were identified. The calculations took account of the time needed to evacuate and rescue the personnel, as well as the pre-set reliability of structures, given that the personnel evacuation and rescue time in case of fire is identified in an experiment.

Keywords: reliability of building structures; probabilistic approach; evacuation and rescue time; dispersion of the fire resistance limit; fire resistance

For citation: Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban A.V. The calculation of required fire resistance limits for engineering structures of technological pipe racks at oil and gas processing plants on the basis of an evaluation of the time needed for personnel evacuation and rescue in case of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2021; 30(5):58-65. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.58-65 (rus).

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

Введение

В настоящее время стандартом ГОСТ Р 12.3.047–2012[1] регламентирована методика определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанная на работах [3, 4]. В этих работах реализован вероятностный подход, когда сравниваются не фиксированные значения предела огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожара, а распределения указанных величин. Аналогичный принцип реализован в британском руководстве PD 7974-7: 2003[2]. Обобщение основных принципов работ [3, 4] проведено в работе [5], где рассмотрены вероятностные аспекты определения условий пожарной безопасности производственных объектов (например, рассмотрение необходимого и расчетного времени эвакуации как случайных величин). Однако на практике реализуются ситуации, когда при отсутствии нормативных требований по огнестойкости собственник объекта из экономических соображений готов примириться с потерей своего объекта, снизив требуемые пределы огнестойкости, которые могут быть рассчитаны согласно ГОСТ Р 12.3.047–2012. При этом в соответствии с Федеральным законом от 22 июня 2009 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»[3] должны быть обеспечены условия безопасной эвакуации (ст. 6, 53) и проведения мероприятий по спасению людей при пожаре (пп. 2 п. 1 ст. 80). В этом случае следует, задавшись вероятностями безопасной эвакуации или спасения, сравнивать распределения, с одной стороны, пределов огнестойкости и, с другой стороны, времени эвакуации или спасения.

Необходимо отметить, что проблема определения требуемых пределов огнестойкости рассматривалась ранее в работах [6–19]. Однако эти работы основывались на детерминистских моделях и не учитывали, что как пределы огнестойкости, так и параметры, определяющие эквивалентную продолжительность пожара, являются случайными величинами. В работе [1] с учетом результатов исследований [3–5] и упомянутого выше британского руководства[2] предложен вероятностный метод расчета требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, основанный на сравнении распределений величин предела огнестойкости и времени эвакуации или спасения людей при пожаре.

В настоящей работе, следуя основным принципам вероятностного подхода, реализованного в работах [1, 3–5], апробирован указанный выше метод определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов. При этом рассматривается несущая способность строительных конструкций, что характерно для этажерок и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли.

С определенным запасом надежности рассматривается пожар, не ограниченный по длительности количеством пожарной нагрузки. Это вызвано большим количеством пожарной нагрузки, сосредоточенной на объекте нефтегазовой отрасли, и не-

[1] ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст.

[2] PD 7974-7: 2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabalistic risk assessment. 26 Jun 2003.

[3] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июня 2009 г. № 123-ФЗ принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

возможностью на данном этапе проектирования достаточно точно определить количество сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, которые могут быть вовлечены в пожар.

Методология определения требуемых пределов огнестойкости

Кратко напомним основные положения методики определения требуемых пределов огнестойкости, изложенной в работах [1, 5]. Как и в работах [1, 5], примем, что условие безопасности (расчетное время спасения меньше предела огнестойкости) отражается соотношением параметров x_1 и x_2, которое записывается в виде:

$$x_1 < x_2, \qquad (1)$$

где x_1 — расчетное время эвакуации или спасения;

x_2 — предел огнестойкости.

Качественная интерпретация условия (1) представлена на рис. 1 [1, 5].

Как было отмечено выше, параметры x_1 и x_2 являются случайными величинами, для которых предполагаются нормальные распределения плотностей вероятности P_1 и P_2 [1]:

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left(\frac{-(x_1 - x_{10})^2}{2\sigma_1^2}\right), \qquad (2)$$

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left(\frac{-(x_2 - x_{20})^2}{2\sigma_2^2}\right), \qquad (3)$$

где σ_1, σ_2 — средние квадратичные отклонения распределений;

x_1 и x_2 — параметры распределения;

x_{10}, x_{20} — центры распределений.

Величина x_{10} для средней величины времени эвакуации рассчитывается методами, регламентированными документом «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»[4].

Величина σ_1 отражает различия в скоростях движения различных групп людей при эвакуации в случае пожара. Для величины x_{10}, характеризующей время спасения людей при пожаре, нет общепринятых методик расчета. Можно сделать лишь экспертное предположение, что время спасения x_{10} будет, по крайней мере, в 2,5–3 раза больше времени эвакуации. Действительно, в случае эвакуации x_{10} — усредненное время самостоятельного движения людей из опасного объекта в безопасную зону. В случае спасения с объекта с малым количеством присутствующего персонала спасатели должны:

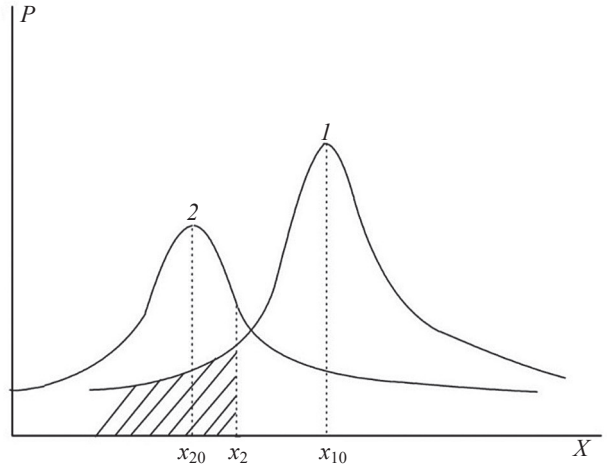


Рис. 1. Качественная интерпретация условия безопасности: *1*, *2* — графики функций (2) и (3) соответственно. Заштрихована область под кривой (2), площадь которой численно равна вероятности выполнения условий (1) при заданном x_2. P — плотность вероятности для рассматриваемых распределений

Fig. 1. The qualitative interpretation of a safety condition: *1*, *2* are graphs of functions (2) and (3). A shaded area below the curve (2) is numerically equal to the probability of fulfillment of conditions (1) at the given x_2 value. P is the probability density for the considered distributions

а) прибыть на объект;

б) принять решение о путях, по которым будет осуществляться спасение;

в) совершить движение по намеченным путям, время которого в силу развития пожара может быть заметно выше, чем время движения к месту проведения спасательных работ (например, в связи с блокированием опасными факторами пожара путей, по которым может быть реализовано спасение).

Величина x_{20} для средней величины предела огнестойкости должна быть определена, исходя из заданной вероятности невыполнения условий безопасной эвакуации Q_0, а также величин x_{10}, σ_1 и σ_2.

Следуя подходу работ [3–5], разработанному для определения надежности строительных конструкций, вероятность Q_0 невыполнения условия безопасной эвакуации (1) для нормальных распределений (2) и (3) может быть описана соотношением:

$$Q_0 = F(-\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{-\gamma}\exp(-x^2/2)dx, \qquad (4)$$

где $F(-\gamma)$ — функция Лапласа, значения которой могут быть заимствованы из [20];

γ — параметр, описываемый соотношением:

$$\gamma = (x_{20} - x_{10})/\sigma_S, \qquad (5)$$

$$\sigma_S = \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2\right)^{1/2}. \qquad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость вероятности Q_0 невыполнения условия безопасной эвакуации (1) от параметра γ (по данным [5]). Эта зависимость

[4] Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 с изменениями, утвержденными приказом МЧС России от 14 декабря 2010 г. № 649.

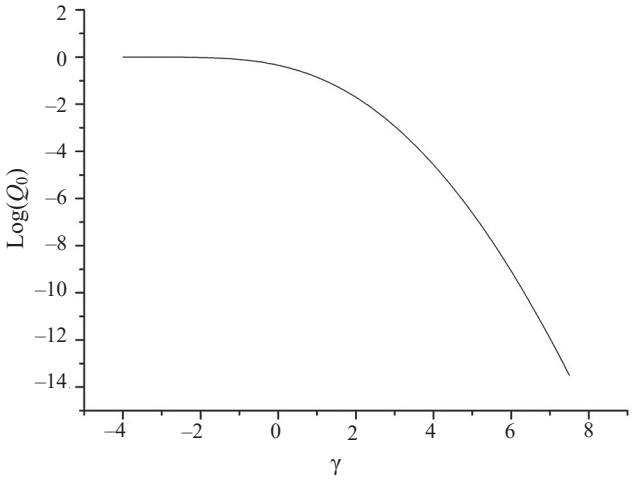


Рис. 2. Зависимость величины вероятности невыполнения условий безопасности от параметра γ

Fig. 2. The dependence of the probability of non-fulfillment of safety conditions on parameter γ

может быть использована для расчета требуемого предела огнестойкости x_{20}.

Для удобства в табл. 1 представлена зависимость параметра γ от величины вероятности невыполнения условий безопасности, рассчитанная по формуле (4).

Метод определения требуемого предела огнестойкости x_{20} заключается в следующем.

Вычисляются расчетное время эвакуации x_{10} и его среднее квадратичное отклонение σ_1. Далее находится среднее квадратичное отклонение для предела огнестойкости σ_2. Задается величина Q_0, исходя из экспертной оценки потери строительными конструкциями своей несущей способности до окончания эвакуации и/или спасения. Из табл. 1 (или исходя из графика, представленного на рис. 2) в зависимости от величины Q_0 находится соответствующий параметр γ. Величину x_{20} затем определяем по формуле, полученной из соотношений (5) и (6):

$$x_{20} = x_{10} + \gamma\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2\right)^{1/2}. \qquad (7)$$

Наиболее трудным вопросом для нахождения требуемого предела огнестойкости x_{20} является определение параметров σ_1 и σ_2, которые, вообще говоря, даже не принимая во внимание процедуру спасения, зависят от качества работ по огнезащите строительных конструкций, контингента эвакуирующихся, знания персоналом имеющихся путей эвакуации. Для случая спасения задача определения параметра σ_1 существенно усложняется в силу малой изученности временных факторов процесса спасения. В данном исследовании мы используем результаты определения времен эвакуации и спасения с этажерки газоперерабатывающего завода, полученные в работе [2].

Расчет требуемых пределов огнестойкости

Ниже представлен расчет требуемых пределов огнестойкости для несущих конструкций технологических этажерок. При этом использовано определенное в работе [2] время спасения, которое, как отмечено выше, существенно превышает расчетное время эвакуации.

Для расчета, как следует из формулы (7), нужны следующие параметры:

- время спасения x_{10};
- параметр γ;
- средние квадратичные отклонения времени спасения σ_1 и огнестойкости конструкций σ_2.

Величины x_{10} и σ_1 берем из работы [2], где на основе проведенных экспериментов и расчетов найдены значения указанных параметров, которые составляют x_{10} = 1924 с и σ_1 = 227 с.

Параметр γ находим, используя табл. 1 для заданной надежности строительных конструкций Q_0. Величина Q_0 определяется, исходя из технико-экономических показателей объекта.

В то же время на основании ГОСТ Р 12.3.047–2012[1] эта величина может быть принята равной 10^{-4}. Поскольку в соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании»[5] стандарт является документом добровольного применения, при необходимости может быть выбрано и иное значение Q_0. Для наглядности в настоящей работе будут рассчитаны требуемые пределы огнестойкости для различных величин Q_0.

Параметры x_{10} и σ_1 определены на основании указанных выше экспериментов [2]. При этом мы учитываем сходство объектов в части путей эвакуации с технологических этажерок.

Параметр σ_2 не может быть определен без детального обследования конструкций объекта. Поскольку на данном этапе это представляется затруднительным, примем его на основании данных британского руководства PD 7974-7: 2003[2]. Согласс-

[5] О техническом регулировании : Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ принят Государственной Думой 15 декабря 2002 г.; одобрен Советом Федерации 18 декабря 2002 г.

Таблица 1. Результаты расчетов параметра γ в зависимости от вероятности Q_0

Table 1. Results of calculations of parameter γ depending on probability Q_0

Q_0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
γ	1,28	2,31	3,09	3,71	4,26	4,75	5,19	5,61	5,99	6,36	6,7	7,03	7,34

но этому документу, характерное значение r отношения σ_2 к величине x_{20} принято равным 0,15, в связи с чем рекомендуется использовать в расчетах эту величину. Для иллюстрации расчет x_{20} будет сделан и для других величин. При этом окончательный выбор на основе экспертных оценок может быть сделан проектировщиком.

Результаты расчетов представлены в табл. 2, в строке которой указаны величины Q_0, а в столбце — значения r. На пересечении строк и столбцов будут указаны соответствующие пределы огнестойкости. На основании этой таблицы может быть сделан выбор необходимой величины, исходя из оценок пожарного риска и технико-экономических показателей. При этом рекомендуется величину Q_0 принять равной 10^{-4} в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047–2012[1], а величину r — равной 0,15 в соответствии с британским руководством PD 7974-7: 2003[2]. Результаты соответствующих расчетов представлены ниже в табл. 2, принимая время спасения равным 1924 с в соответствии с данными работы [2].

Некоторые компании предъявляют требования к отношению отклонения предела огнестойкости к его целевой номинальной величине, которое не должно превышать 0,1 (r = 0,1). При строительстве объекта при реализации указанного требования и принимая Q_0 равным 10^{-4} в соответствии с табл. Р1 ГОСТ Р 12.3.047–2012[1], по табл. 2 данной работы находим, что требуемый предел огнестойкости составляет 58 мин. Используя классификацию п. 1 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»[3] принимаем требуемый предел огнестойкости равным 60 мин. Отметим также, что данный вывод справедлив и в случае, если пределы огнестойкости некоторых конструкций превышают величину требуемого предела, увеличенного на 10 % (т.е. 66 мин).

Ниже для иллюстрации представлен пример расчета требуемого предела огнестойкости несущих конструкций этажерок x_{20} при величине надежности строительной конструкции $Q_0 = 10^{-4}$ и величине r = 0,1.

Параметр γ принимаем равным 3,71 в соответствии с данными табл. 1 для величины надежности строительной конструкции $Q_0 = 10^{-4}$.

Величины x_{10} и σ_1 берем из работы [2], в которой на основе проведенных экспериментов найдены значения указанных параметров: x_{10} = 1924 с и σ_1 = 227 с. Далее решается уравнение (7) с учетом взаимосвязи параметров x_{20} и σ_2 ($r = \sigma_2/x_{20}$). Корень указанного выше уравнения равен 3459 с (58 мин).

При получении уточненных данных по средним квадратичным отклонениям пределов огнестойкости огнезащищенных конструкций, которые может дать только производитель этих конструкций (или производитель соответствующих средств огнезащиты), рекомендации по выбору требуемых пределов огнестойкости могут быть уточнены.

Выводы

В настоящей работе определены требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок одного газоперерабатывающего завода, учитывающие время, требуемое для эвакуации и спасения персонала, а также заданную надежность строительных конструкций, на основе экспериментального определения времен эвакуации и спасения персонала с указанных этажерок при пожаре. Получена зависимость требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций от заданной величины надежности строительных конструкций при пожаре.

Исходя из предположения о том, что отношение среднего квадратичного отклонения предела огнестойкости к его целевой номинальной величине не будет превышать 0,1 (r = 0,1), и принимая требуемую надежность конструкций равной 10^{-4} в соответствии с табл. Р1 ГОСТ Р 12.3.047–2012[1], определена величина требуемого предела огнестойкости, которая составила 58 мин. На основании классификации п. 1 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»[3] требуемый предел огнестойкости может быть

Таблица 2. Результаты расчетов требуемых пределов огнестойкости x_{20} (мин) в зависимости от заданной величины надежности строительных конструкций Q_0 и величины $r = \sigma_2/x_{20}$

Table 2. Results of calculations of required fire resistance values x_{20} (min) depending on the pre-set reliability of structures Q_0 and the value of $r = \sigma_2/ x_{20}$

r	Q_0				
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
0,05	37	42	46	49	52
0,1	39	46	52	58	64
0,15	41	52	64	77	95
0,2	44	62	87	128	221

принят равным 60 мин. Данный вывод справедлив и в случае, если пределы огнестойкости некоторых конструкций превышают величину требуемого предела, увеличенного на 10 % (т.е. 66 мин). Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании предприятий нефтегазовой отрасли в части определения требуемых пределов огнестойкости для несущих конструкций технологических этажерок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н.* Методы определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 11. С. 51–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57
2. *Лагозин А.Ю., Шебеко Ю.Н., Леончук П.А., Клементьев Б.А., Самошин Д.А.* Экспериментальное исследование процессов эвакуации и спасения людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 69–74. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-69-74
3. *Присадков В.И.* Надежность строительных конструкций при пожаре // Огнестойкость строительных конструкций : сб. тр. М. : ВНИИПО, 1986. С. 70–73.
4. *Присадков В.И.* Разработка методов выбора рациональных систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. … д-ра техн. наук. М. : ВНИИПО, 1990. 290 с.
5. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю.* Условия пожарной безопасности при определении допустимых параметров функционирования производственных объектов // Пожарная безопасность. 2009. № 4. С. 61–66.
6. *Law M.* A Review of Formulae for T- Equivalent // Fire Safety Science. Melburne, IAFSS, 1997. Vol. 5. Pp. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985
7. *Thomas G.C., Buchanan A.H., Freischmann C.M.* Structural fire design: the role of time equivalence // Fire Safety Science. Melbourne, IAFSS, 1997. Vol. 5. Pp. 607–618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607
8. *Cadorin J.F., Perez Jimenez C., Franssen J.M.* Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time // Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Ulster : University of Ulster, 2004. Pp. 547–557.
9. *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н.* Взаимосвязь величин температуры строительных конструкций при стандартном и углеводородном температурных режимах пожара // Пожарная безопасность. 2017. № 2. С. 41–45.
10. *Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М.* Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для стальных конструкций технологической эстакады нефтеперерабатывающего предприятия // Пожарная безопасность. 2017. № 1. С. 25–29.
11. *Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М.* Требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций высотных зданий // Пожарная безопасность. 2012. № 4. С. 31–39.
12. *Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C.* Behavior of steel columns subjected to firee // Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Leeds, 2010. Pp. 879–889.
13. *Toric N., Peros B., Boro I.* Reliability of steel structures under fire conditions // Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Leeds, 2010. Pp. 890–901. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-02
14. *Баратов А.Н., Молчадский И.С.* Горение на пожаре. М. : ВНИИПО, 2011. 502 с.
15. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В., Брешина В.Н., Шкутова Т.В.* Обеспечение нормируемой огнестойкости стальных конструкций основания резервуаров в условиях температурного режима углеводородного пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 17–25.
16. *Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong Wang.* Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 101. No. 1. Pp. 25–38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006
17. *Meijing Lui, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Rummin Ding, Ting Zhu.* Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 100. No. 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006

18. *Maciulaitis R., Grigonis M., Malaskiene J.* The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // Fire Safety Journal. Vol. 98. No. 1. Pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007
19. *Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G.* Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. No. 1. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
20. *Янке Е., Элиде Ф., Леш Ф.* Специальные функции. М. : Наука, 1968. 342 с.

REFERENCES

1. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Giletich A.N. Method of a determination of required fire resistance limits for building structures of industrial objects. *Pozharovzrivobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):51-57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.51-57 (rus).
2. Lagozin A.Yu., Shebeko Yu.N., Leonchuk P.A., Klementev B.A., Samoshin D.A. Experimental study of the processes of evacuation and rescue of people in case of fire from the pipe rack of the technological line of the gas processing plant. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 6:69-74. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-69-74 (rus).
3. Prisadkov V.I. A realibility of building structures at a fire. *Fire resistances of building structures*. Moscow, VNIIPO, 1986; 70-73. (rus).
4. Prisadkov V.I. *A creation of methods for a choice of an optimal fire protection system for industrial buildings : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, VNIIPO, 1990, 290. (rus).
5. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. About the fire safety conditions to determine the admissible parameters of industrial premises functioning. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2009; 4:61-66. (rus).
6. Law M.A. A Review of Formulae for T-Equivalent. *Fire Safety Science*. Melburne, IAFSS, 1997; 5:985-996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985
7. Thomas G.C., Buchanan A.N., Freischmann C.M. Structural fire design: the role of time equivalence. *Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science.* Melbourne, IAFSS, 1997; 5:607-618. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-607
8. Cadorin J.F., Perez Jimenez C., Franssen J.M. Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time. *Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards.* Ulster, University of Ulster, 2004; 547-557.
9. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N. A relationship of a temperature of building constructions at a standard and a hydrocarbon regimes of a fire. *Pozharnaya Bezopasnost/Fire Safety*. 2017; 1:25-29. (rus).
10. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. A settlement assessment of equivalent fire duration for steel structures of pipe rack of a refinery. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2012; 4:31-39. (rus).
11. Shebeko A.Yu., Giletich A.N., Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. The required fire resistance limits for the high-rise buildings structures. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2012; 4:31-39. (rus).
12. Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C. Behavior of steel columns subjected to fire. *Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards.* University of Leeds, 2010; 879-889.
13. Toric N., Peros B., Boro I. Realiability of steel structures under fire conditions. *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards.* University of Leeds, 2010; 890-901. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-02
14. Baratov A.N., Molchadsky I.S. *Combustion at a fire.* Moscow, VNIIPO, 2011; 502. (rus).
15. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V., Breshina V.N., Shkutova T.V. Ensuring the normable fire resistance of tank base steel structures in conditions of temperature regime of hydrocarbon fire. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety.* 2018; 2:17-25. (rus).
16. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal.* 2018; 101(1):25-38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006
17. Meijing Lui, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Rummin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints. *Fire Safety Journal*. 2018; 100(1):1-19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006
18. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*. 2018; 98(1):15-23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007

19. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95(1):42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
20. Yanke E., Elide F., Lesh F. *Special functions*. Moscow, Nauka publ., 1968; 342. (rus).

Поступала 06.07.2021, после доработки 29.07.2021;
принята к публикации 09.08.2021
Received July 6, 2021; Received in revised form July 29, 2021;
Accepted August 9, 2021

Информация об авторах

ШЕБЕКО Алексей Юрьевич, д-р. техн. наук, 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, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 184443; Scopus Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@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, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.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, 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

Information about the authors

Aleksey Yu. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 184443; Scopus Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@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, VNIIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), 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, VNIIPO, 12, Balashikha, 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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):66-75

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 621.039.586
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75

Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях

Станислав Андреевич Титов✉, Николай Михайлович Барбин, Антон Михайлович Кобелев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье проведен системный и статистический анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях (АЭС) в различных странах мира за период с 1955 по 2019 годы. Определены страны, в которых происходили пожары на атомных электростанциях (США, Великобритания, Швейцария, СССР, Германия, Испания, Япония, Россия, Индия и Франция). Выявлены основные объекты возникновения пожаров, указаны причины возгораний. Указаны типы реакторов, на которых случались аварии и инциденты, сопровождаемые крупными пожарами.

Анализ основных аварийных ситуаций на атомных электростанциях, сопровождаемых крупными пожарами. За период 1955–2019 годы было зарегистрировано 27 крупных пожаров на АЭС. Пожары происходили в 10 странах. Самое большое количество крупных возгораний (три возгорания) было зарегистрировано в 1984 г. Все они происходили в СССР. Часто возникающими основными объектами аварийной ситуации были трансформаторы и кабельные каналы — 40 %, активная зона реактора — 15 %, турбина реактора — 11 %, корпус реактора — 7 %, паропроводные системы, градирни — 7 %. Основными причинами возникновения пожаров были технические неисправности — 33 %, вина персонала — 30 %, короткие замыкания — 18 %, стихийные бедствия (природные условия) — 15 % и неизвестные причины — 4 %. Большее количество пожаров было зарегистрировано на реакторах РБМК — 6, ВВЭР — 5, BWR — 3, PWR — 3.

Выводы. Проанализировав аварии с крупными пожарами на АЭС за время с 1955 по 2019 годы, авторы пришли к выводу, что самое большое количество крупных пожаров было зарегистрировано в СССР. При этом для обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла АЭС является применение таких мер, которые предотвращали бы возникновение тяжелых пожаров и обеспечивали защиту персонала и населения от воздействия радиационной аварии.

Ключевые слова: авария; инцидент; пожар; реакторы; технические неисправности; выброс радиоактивности; аварийная остановка

Для цитирования: *Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М.* Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75

✉ Титов Станислав Андреевич, e-mail: tsa-nhl@mail.ru

The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants

Stanislav A. Titov✉, Nikolai M. Barbin, Anton M. Kobelev

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

ABSTRACT

Introduction. The article provides a system and statistical analysis of emergency situations associated with fires at nuclear power plants (NPPs) in various countries of the world for the period from 1955 to 2019. The countries, where fires occurred at nuclear power plants, were identified (the USA, Great Britain, Switzerland, the USSR, Germany, Spain, Japan, Russia, India and France). Facilities, exposed to fires, are identified; causes of fires are indicated. The types of reactors where accidents and incidents, accompanied by large fires, have been determined.

The analysis of major emergency situations at nuclear power plants accompanied by large fires. During the period from 1955 to 2019, 27 large fires were registered at nuclear power plants in 10 countries. The largest number of major fires was registered in 1984 (three fires), all of them occurred in the USSR. Most frequently, emergency situations occurred at transformers and cable channels — 40 %, nuclear reactor core — 15 %, reactor turbine — 11 %, reactor vessel — 7 %, steam pipeline systems, cooling towers — 7 %. The main causes of fires

© С.А. Титов, Н.М. Барбин, А.М. Кобелев, 2021

were technical malfunctions — 33 %, fires caused by the personnel — 30 %, fires due to short circuits — 18 %, due to natural disasters (natural conditions) — 15 % and unknown reasons — 4 %. A greater number of fires were registered at RBMK — 6, VVER — 5, BWR — 3, and PWR — 3 reactors.

Conclusions. Having analyzed accidents, involving large fires at nuclear power plants during the period from 1955 to 2019, we come to the conclusion that the largest number of large fires was registered in the USSR. Nonetheless, to ensure safety at all stages of the life cycle of a nuclear power plant, it is necessary to apply such measures that would prevent the occurrence of severe fires and ensure the protection of personnel and the general public from the effects of a radiation accident.

Keywords: accident; incident; fire; reactors; technical malfunctions; release of radioactivity; emergency shutdown

For citation: Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):66-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75 (rus).

✉ Stanislav Andreevich Titov, e-mail: tsa-nhl@mail.ru

Введение

Опыт эксплуатации АЭС показал, что каждая аварийная ситуация, связанная с пожаром на АЭС, влечет за собой серьезные последствия[1] [1–8]. В данной работе рассмотрены все основные аварийные ситуации на АЭС, сопровождавшиеся крупными пожарами, которые происходили в период с 1955 по 2019 годы. По данным авариям проведен системный и статистический анализ. Исследуемые материалы были взяты из источников[1] [9–19].

Для выполнения системного анализа были выделены основные факторы: количество аварий на АЭС с крупными пожарами; страна, в которой происходило аварийное событие (США, Великобритания, Швейцария, СССР, Германия, Испания, Россия, Индия, Франция, Япония); год аварийной ситуации; объекты аварий (трансформаторы и кабельные каналы, активная зона реактора, турбина реактора, корпуса реактора, паропроводные системы, градирни, контур реактора и системы охлаждения, насосы и насосные системы, аварийные системы, датчики и механизмы системы давления и др.); причины возникновения аварийных ситуаций (техническая неисправность, вина персонала, короткое замыкание, стихийное бедствие (природные условия) и неизвестные причины); типы (виды) реакторов (РБМК, ВВЭР, PWR, BWR, EBR-1, GCR, PHWR, Windscale-1). При анализе статистических данных использовали программы Microsoft Excel, Microsoft Word.

Анализ основных аварийных ситуаций на атомных электростанциях, сопровождавшихся крупными пожарами, которые происходили в период с 1955 по 2019 годы

За всю историю атомной энергетики самое большое количество крупных пожаров на АЭС, в частности девять, было зафиксировано в СССР.

Технические неисправности стали причинами четырех пожаров. Первый возник 7 января 1974 г. на Ленинградской АЭС, которая расположена в Ленинградской области в городе Сосновый Бор. Возгорание было связано со взрывом железобетонного газгольдера в первом энергоблоке реактора РБМК. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции. Второй пожар произошел 14 декабря 1984 г. на Южно-Украинской АЭС, которая находится в Николаевской области Украины на берегу Южного Буга в городе Южноукраинск. Данный инцидент был связан с загоранием кабелей в реакторном отделении реактора ВВЭР-1000. Пожар ликвидирован при помощи автоматических систем пожаротушения, пожарной командой из персонала станции и специальной пожарно-спасательной частью (СПСЧ). Последствия случившегося — аварийная остановка АЭС. Третий крупный пожар возник 5 сентября 1988 г. на Игналинской АЭС, которая находится на северо-востоке Литвы. Возгорание произошло из-за перегрева кабелей в кабельной станции на блоке № 2 реактора РБМК-1500. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции. Последствия случившегося привели к остановке блока реактора. Четвертый пожар был зафиксирован 11 октября 1991 г. на Чернобыльской АЭС, расположенной на севере Украины на берегу реки Припять. Из-за конструктивной недоработки в машинном зале электростанции произошло возгорание на блоке № 2 реактора РБМК, что привело к крупному пожару и аварийной остановке реактора с последующим выбросом радиоактивности. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ.

Два крупных пожара произошли по вине персонала. Первый — 15 октября 1982 г. на Армянской АЭС, которая расположена на территории Армянской Советской Социалистической Республики, вблизи города Мецамор. Из-за ошибочных действий персонала возник взрыв генератора на первом

[1] Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: http://www.rosatom.ru/

энергоблоке реактора ВВЭР, что повлекло за собой значительное выгорание машинного зала с последующей аварийной остановкой реактора. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ. Второй крупный пожар произошел в ночь с 25 на 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС. В ходе эксперимента случилось возгорание водорода и взрыв активной зоны реактора РБМК-1000 [9–12]. В тушении сложного пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и сотрудники СПСЧ.

Два пожара были зарегистрированы в 1984 г. из-за короткого замыкания. Первый произошел 27 января на Запорожской АЭС, что расположена в Запорожской области Украины в городе Энергодар, где случилось замыкание с последующим возгоранием кабелей в реакторном отделении на энергоблоке № 1 реактора ВВЭР-1000. Последствия случившегося привели к аварийной остановке реактора. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ. Второй пожар возник 18 декабря на Калининской АЭС, которая расположена на севере Тверской области в 150 км от города Твери. В насосе технической воды на энергоблоке № 1 реактора ВВЭР-1000 возникло замыкание, что привело к крупному пожару и аварийной остановке реактора. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ.

Один пожар произошел из-за природных условий, сильного мороза, 31 декабря 1978 г. на Белоярской АЭС, расположенной в Свердловской области, в городе Заречный. Из-за сильного мороза железобетонные конструкции крыши турбинного зала не выдержали перепада температуры, тяжелые балки рухнули на работающую турбину, загорелся маслобак, огонь распространился по кабельным тоннелям. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ[1].

В США произошло четыре пожара. Два случилось по вине персонала. Первый пожар возник 29 ноября 1955 г. в штате Айдахо. Данное возгорание было связано с саморазрушением экспериментального реактора EBR-1 и расплавлением активной зоны, что привело к крупному пожару с последующей аварийной остановкой. В ликвидации пожара участвовала пожарная команда из персонала станции. Второй произошел 22 марта 1975 г. на АЭС «Браунз Ферри», станция расположена в штате Алабама. Возгорание было связано с повреждением кабелей собственных нужд, что привело к аварийной остановке реактора BWR и возникновению пожара. В тушении задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда персонала станции [12]. Из-за короткого замыкания один пожар случился 10 мая 1986 г. на АЭС «Браунз Ферри», что расположена в округе Лаймстоун штата Алабама, где произошло сгорание градирни (устройство для охлаждения большого количества воды). Данный инцидент привел к серьезному пожару и аварийной остановке станции. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции. По технической неисправности 9 октября 1989 г. в округе Уэйк штата Северная Каролина на АЭС «Широн Харрис» произошел еще один крупный пожар. Возгорание случилось в главном трансформаторе станции с распространением огня в оборудование главного генератора реактора PWR, что привело к его аварийной остановке. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции[1].

В Японии за данный период было зарегистрировано четыре аварийные ситуации с крупными пожарами. Первая произошла по вине персонала 9 августа 2004 г. на АЭС «Михама», станция находится в городе Михама на побережье Японского моря. Из-за халатности персонала в турбинном зале третьего реактора типа PWR случился прорыв трубы второго контура, в результате чего возникли пожар и отключение реактора. Три пожара были связаны со стихийными бедствиями (землетрясениями). Первый — 16 июля 2007 г. на АЭС «Касивазаки-Карива», которая расположена в японском городе Касивадзаки. На трансформаторе третьего блока реактора BWR произошло возгорание, что привело к крупному пожару с дальнейшей остановкой АЭС и выбросу радиоактивности в атмосферу. Второй и третий пожар возникли 11 марта 2011 г., когда случилось «Великое землетрясение Восточной Японии», при котором вышли из строя две станции: АЭС «Онагава», расположенная на побережье Тихого океана, в городе Онагава, на которой в результате сильного землетрясения в турбинном зале возник пожар, что привело к аварийной остановке станции; АЭС «Фукусима-1», которая находится вблизи города Окума на побережье Тихого океана, где во время землетрясения и последующего за ним цунами произошло обесточивание станции, что привело к расплавлению активной зоны реакторов BWR с последующим взрывом, выбросом радиоактивности и аварийной остановке станции [13–15].

В России произошло три крупных пожара на АЭС. Первый случился 10 февраля 2008 г.

на Курской АЭС, расположенной в Курской области, в г. Курчатове. Из-за технической неисправности на щеточно-контактном аппарате генератора № 1 реактора РБМК возникло возгорание с последующим переходом в пожар. Второй пожар произошел 18 февраля 2018 г. на Курской АЭС, где по неизвестным причинам случилось возгорание на трансформаторе для собственных нужд станции, что привело к отключению энергоблока № 4 реактора РБМК. Третий пожар произошел 18 июля 2019 г. на Калининской АЭС. Из-за короткого замыкания началось возгорание в трансформаторе для собственных нужд станции, что привело к отключению четвертого энергоблока реактора ВВЭР[1] [9].

В Великобритании было зафиксировано два крупных пожара на АЭС. Первый пожар произошел в 1957 г. Из-за технической неисправности случился перегрев активной зоны реактора Windscale-1, вследствие чего были остановлены два реактора № 1 и 2 и замечен рост радиоактивности в окружающей среде[1] [9, 16–18]. В тушении пожара участвовала пожарная команда из персонала станции. Второй пожар возник 26 октября 2009 г. на юго-востоке Великобритании на АЭС «Данденесс Би». Возгорание произошло в котельном помещении станции с дальнейшими радиоактивными выбросами и остановкой станции по вине персонала. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции [9].

В Швейцарии был отмечен один пожар 29 июля 1971 г. на АЭС «Мюленберге», которая расположена на берегу реки Аар в муниципалитете Мюлеберг. Из-за технической неисправности вследствие сильной вибрации маслопровода случился прорыв небольшой масляной трубки, выброшенное под давлением масло попало на горячие поверхности турбины, что привело к ее возгоранию [16–18].

В Германии был зарегистрирован один пожар, который произошел 7 декабря 1975 г. на АЭС «Грайфсвальд». В результате ошибочных действий персонала и последующего отказа автоматического выключателя в распределительном устройстве возникло короткое замыкание с последующим возгоранием и радиоактивными выбросами в атмосферу.

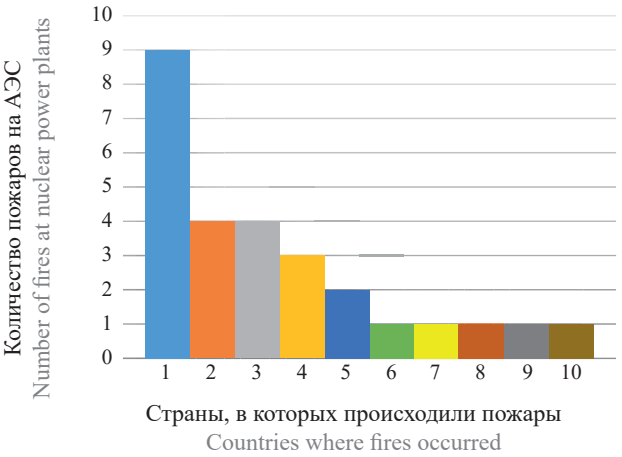
В Испании был зафиксирован один пожар 19 октября 1989 г. на АЭС «Ванделос», которая расположена в городе Вандельос. Из-за технической неисправности в машинном зале электростанции случилось возгорание на первом блоке реактора типа GCR, последствия случившегося привели к крупному пожару и аварийной остановке реактора.

В Индии был зарегистрирован один пожар, который произошел в июне 2012 г. на АЭС «Раджастан». Станция расположена в индийском штате Раджастхан, вблизи города Кота. Из-за нарушения персоналом станции правил по охране труда во время проводимых сварочных работ на реакторе PHWR возник пожар, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу и аварийной остановке станции.

Во Франции произошел один пожар. 9 февраля 2017 г. на АЭС «Фламанвиль», которая расположена на берегу пролива Ла-Манш рядом с городом Шербур. Из-за технической неисправности вентилятора произошло возгорание обмотки проводов в машинном зале третьего энергоблока реактора PWR, в результате случившегося был крупный пожар и аварийная остановка реактора[1].

За 1955–2019 годы было зарегистрировано 27 крупных пожаров на АЭС. Пожары происходили в 10 странах: США, Великобритании, Швейцарии, СССР, Германии, Испании, Японии, России, Индии и Франции (рис. 1).

Самое большое количество пожаров было замечено в СССР, в частности девять: в 1974, 1978, 1982, 1984, 1984, 1984, 1986, 1988, 1991 годах. Четыре крупных пожара было зафиксировано в США: в 1955, 1975, 1986, 1989 годах, также четыре пожара произошло в Японии: в 2004, 2007, 2011, 2011 годах. Три пожара случилось в России: в 2008, 2018, 2019 годах, два в Великобритании: в 1957, 2009 годах, и по одному пожару произошло



1. СССР – 9 / USSR
2. США – 4 / USA
3. Япония – 4 / Japan
4. Россия – 3 / Russia
5. Великобритания – 2 / Great Britain
6. Испания – 1 / Spain
7. Франция – 1 / France
8. Германия – 1 / Germany
9. Швейцария – 1 / Switzerland
10. Индия – 1 / India

Рис. 1. Страны возникновения крупных пожаров на АЭС
Fig. 1. Countries of large fires at nuclear power plants

в Швейцарии — в 1971 г., в Германии — в 1975 г., в Испании — в 1989 г., в Индии — в 2012 г. и во Франции — в 2017 г. (рис. 2).

Чаще всего объектами аварий становились трансформаторы и кабельные каналы — 40 %, активная зона реактора — 15 %, турбина реактора — 11 %, корпуса реактора — 7 %, паропроводные системы, градирни — 7 %, контур реактора и системы охлаждения — 4 %, насосы и насосные системы — 4 %, разные случаи возникновения аварии — 4 %, аварийные системы — 4 %, датчики и механизмы системы давления — 4 % (рис. 3).

Аварийные ситуации с крупными пожарами в трансформаторах и кабельных каналах происходили 11 раз: СССР — 1984, 1984, 1988, 1991 гг.; США — 1975, 1989 гг.; Япония — 2007 г.; Россия — 2018, 2019 гг.; Испания — 1989 г.; Франция — 2017 гг.; в активной зоне реактора — 4 раза: СССР — 1986, США — 1955, Япония — 2011, Великобритания — 1957; в турбине реактора — 3 раза: США — 1955, СССР — 1986, Япония — 2011; в корпусе реактора — 2 раза: СССР — 1974, Индия — 2012; в паропроводных системах, градирни — 2 раза: СССР — 1982, США — 1986; на контуре реактора и в системах охлаждения — 1 раз: Япония — 2004; в насосах и насосных системах — 1 раз: СССР — 1984, в котельном помещении — 1 раз: Великобритания — 2009, в аварийной системе — 1 раз: Германия — 1975, на дат-

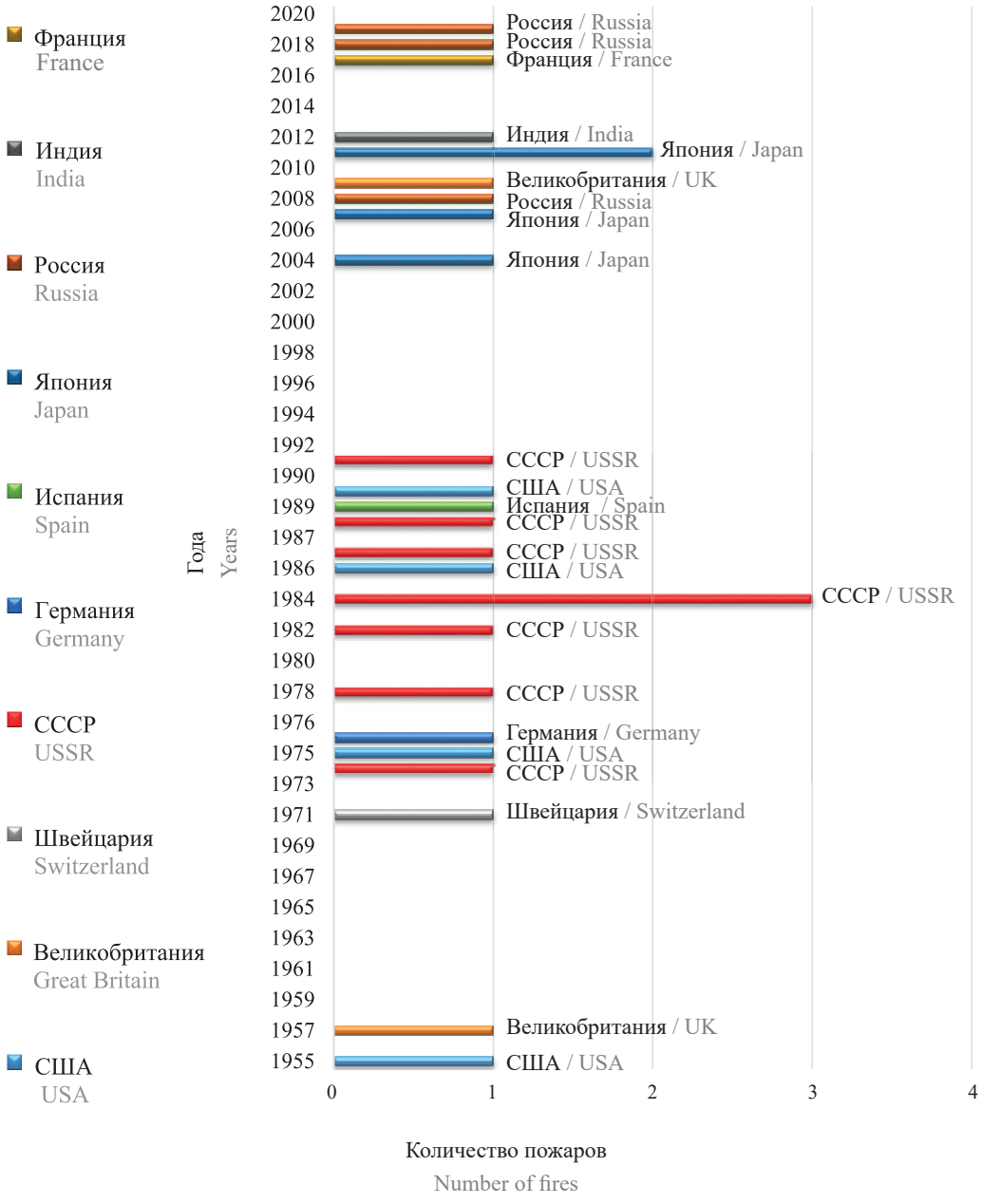


Рис. 2. Количество аварийных ситуаций с крупными пожарами, происходившими на АЭС по годам

Fig. 2. Number of accidents, involving large fires that occurred at nuclear power plants, broken down by year

чиках и в механизмах системы давления — 1 раз: Россия — 2008 г.

За рассматриваемый период на АЭС аварийные ситуации с крупными пожарами чаще всего случались по техническим неисправностям (рис. 4). Количество пожаров, произошедших из-за технических неисправностей — 33 %, по вине персонала — 30 %, короткие замыкания — 18 %, из-за стихийного бедствия (природных условий) — 15 % и по неизвестным причинам — 4 %. Большинство крупных пожаров на АЭС происходило из-за технических неисправностей — 9, по вине персонала — 8, из-за коротких замыканий — 5, из-за стихийного бедствия (природных условий) — 4 и один пожар был по неизвестным причинам [19].

Наибольшее количество пожаров было зарегистрировано на АЭС с типами реакторов РБМК — 6: СССР — в 1974, 1986, 1988, 1991 гг.; Россия — в 2008, 2018 гг.; ВВЭР — 5: СССР — в 1982, 1984, 1984, 1984 гг.; Россия — в 2019 г.; BWR — 3: США — в 1975 г., Япония — в 2007, 2011 гг.; PWR — 3: США — в 1989 г., Япония — в 2004 г., Франция — в 2017 г.; EBR-1 — 1: США — в 1955 г., GCR — 1: Испания — в 1957 г.; PHWR — 1: Индия — в 2012 г.; Windscale-1 — 1: Великобритания — в 1957 г. (табл.).

Выводы

Проанализировав аварии с крупными пожарами на АЭС за период с 1955 по 2019 гг., авторы пришли к выводу, что самое большое количество крупных пожаров было зарегистрировано в 1984 г., в частности, три, все они происходили в СССР. Часто возникающими основными объектами аварийной ситуации становились трансформаторы и кабельные каналы (40 % всех аварийных ситуаций), активная зона реактора (15 %), турбина реактора (11 %). Основными причинами возникновения пожаров были технические неисправности — 33 %, вина персонала — 30 %. Наибольшее количество крупных пожаров произошло на реакторах типа РБМК — шесть и ВВЭР — пять. При этом для обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла АЭС является применение таких мер, которые предотвращали бы возникновение тяжелых пожаров и обеспечивали защиту персонала и населения от воздействия радиационной аварии [20–23].

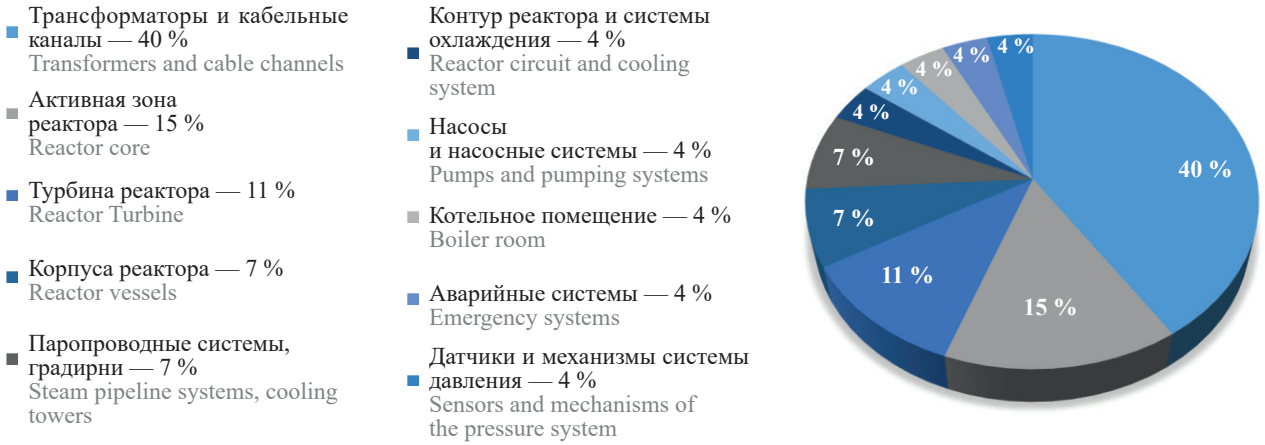


Рис. 3. Основные объекты возникновения пожаров на АЭС

Fig. 3. Principal seats of fire at nuclear power plants

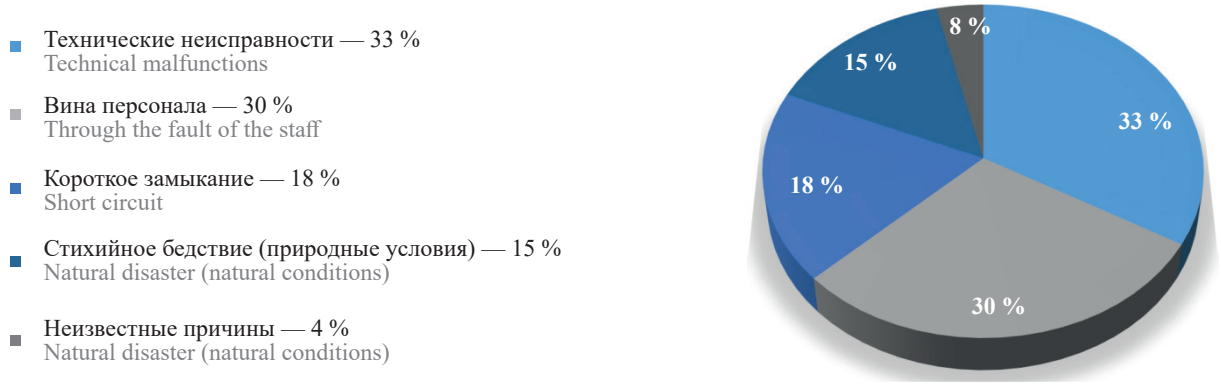


Рис. 4. Основные причины возникновения пожаров на АЭС

Fig. 4. Principal causes of fires at nuclear power plants

Пожары, возникшие на различных реакторах
Fires that occurred at various reactors

Объекты возникновения пожаров Fire seats	Типы реакторов, страны возникновения, год Types of reactors, country of origin, year							
	РБМК / RMBK	ВВЭР / VVER	BWR	PWR	EBR	GCR	PHWR	Windscale-1
Трансформаторы и кабельные каналы Transformers and cable channels	СССР —1988 USSR — 1988 СССР — 1991 USSR — 1991 Россия — 2018 Russia —2018	СССР — 1984 USSR — 1984 СССР — 1984 USSR —1984 Россия — 2019 Russia — 2019	США — 1975 USA — 1975 Япония — 2007 Japan — 2007	США — 1989 USA — 1989 Франция — 2017 France — 2017		Испания — 1989 Spain — 1989		
Активная зона реактора Reactor core	СССР — 1986 USSR — 1986		Япония — 2011 Japan — 2011		США — 1955 USA — 1955			Великобритания — 1957 Great Britain — 1957
Корпуса реактора Reactor vessels	СССР — 1974 USSR — 1974						Индия — 2012 India — 2012	
Датчики и механизмы системы давления Pressure system sensors and mechanisms	Россия — 2008 Russia — 2008							
Насосы и насосные системы Pumps and pumping systems		СССР — 1984 USSR — 1984						
Контур реактора и системы охлаждения Reactor circuit and cooling system				Япония — 2004 Japan — 2004				
Паропроводные системы, градирни Steam pipe systems, cooling towers		СССР — 1982 USSR — 1982						

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Hall J.R., Harwood B.* The national estimates approach to US fire statistics // Fire Technology. 1989. Vol. 25. No. 2. Pp. 99–113.

2. The IAEA. Assessment of the fire hazard analysis of nuclear power plants. Vienna. 1995. 52 p.
3. *Kim S., Lee S.* Maximum likelihood estimation of probabilistic non-suppression model for OECD NPP electrical fire applying non-negative continuous distribution // Fire Safety Journal. 2021. Vol. 122. P. 103323. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103323
4. *Nayak A., Kulkarni P.* Severe accidents in nuclear reactors. Woodhead Publishing, 2021. 394 p.
5. *Thomson J.R.* High integrity systems and safety management in hazardous industries. Butterworth-Heinemann, 2021. 360 p.
6. *Wang J., Li X., Allison C., Hohorst J.* Nuclear power plant design and analysis codes. Woodhead Publishing, 2020. 608 p.
7. *Kumar S.* Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants. Academic Press, 2021. 260 p.
8. *Petrangeli G.* Nuclear safety. Butterworth-Heinemann, 2019. 586 p.
9. *Титов С.А., Кобелев А.М., Барбин Н.М., Омельченко Д.В.* Пожары на атомных электростанциях // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. уч., посвящ. 30-летию МЧС России (14–16 декабря 2020 г.). Ч. 1. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. С. 157–159.
10. *Шойгу С.К.* Чернобыль 25 лет спустя. М., 2011. 5 с.
11. *Ключников А.А., Пазухин Э.М., Шигера Ю.М., Шигера В.Ю.* Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними. К. : Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. С. 50–77.
12. *Соловьева С.П.* Аварии и инциденты на атомных электростанциях : учебное пособие. Обнинск, 1992. С. 134–273.
13. IAEA. Accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant report of the director general. Austria, 2015. Pp. 14–127.
14. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П.* Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М., 2018. 408 с.
15. *Пристер Б.С., Ключников А.А., Барьяхтар В.Г., Шестопалов В.М., Кухарь В.П.* Проблемы безопасности атомной энергетики // Уроки Чернобыля : монография. Чернобыль, 2016. С. 71–77.
16. *Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M.* Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. Issue 2. P. 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
17. *Титов С.А., Барбин Н.М., Зубарев И.А., Кобелев А.М.* Аварийные ситуации на АЭС в США, России и в странах западной Европы за период 1972–1982 годы // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Кампания «мой город готовится»: задачи, проблемы, перспективы : сб. ст. по мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 1–31 октября 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 256–258.
18. *Кобелев А.М., Барбин Н.М., Терентьев Д.И., Зубарев И.А., Титов С.А.* Экологические последствия при возможной запроектной аварии на атомных электростанциях с реакторами типа РБМК-1000 и ЭГП-6 // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Кампания «мой город готовится»: задачи, проблемы, перспективы : сб. ст. по мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 1–31 октября 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 391–394.
19. *Dhillon B.S.* Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants. CRC Press, 2017. Pp. 62–88. DOI: 10.1201/b22260
20. *Яковлев Р.М., Обухова И.А.* На пути к безопасной атомной энергетике // Биосфера. 2017. Т. 9. № 2. С. 123–135. DOI: 10.24855/biosfera.v9i2.354 URL: http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/354
21. IAEA. Safety of nuclear power plant design. Vienna, 2016. 116 p.
22. IAEA, Assessment of the state of development of the national nuclear infrastructure of the IAEA. Vienna, 2009. NG-T-3.2. 82 p.
23. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В.* Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88

REFERENCES

1. Hall J.R., Harwood B. The national estimates approach to US fire statistics. *Fire Technology*. 1989; 25(2):99-113.

2. *The IAEA. Assessment of the fire hazard analysis of nuclear power plants*. Vienna. 1995; 52.
3. Kim S., Lee S. Maximum likelihood estimation of probabilistic non-suppression model for OECD NPP electrical fire applying non-negative continuous distribution. *Fire Safety Journal*. 2021; 122:103323. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103323
4. Nayak A., Kulkarni P. *Severe accidents in nuclear reactors*. Woodhead Publishing, 2021.
5. Thomson J.R. *High integrity systems and safety management in hazardous industries*. Butterworth-Heinemann, 2021; 360.
6. Wang J., Li X., Allison C., Hohorst J. *Nuclear power plant design and analysis codes*. Woodhead Publishing, 2020; 608.
7. Kumar S. *Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants*. Academic Press, 2021; 260.
8. Petrangeli G. *Nuclear Safety*. Butterworth-Heinemann, 2019; 586.
9. Titov S.A., Kobelev A.M., Barbin N.M., Omelchenko D.V. Fires at nuclear power plants. *Actual Problems and Innovations in Ensuring Security : a collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 30th anniversary of the EMERCOM of Russia (December 14–16, 2020)*. Part 1. Ekaterinburg, Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 157-159. (rus).
10. Shoigu S.K. *Chernobyl 25 years later*. Moscow, 2011; 5. (rus).
11. Klyuchnikov A.A., Pazukhin E.M., Shigera Yu.M., Shigera V.Yu. *Nuclear power plant radioactive waste and methods of handling them*. Kiev, Institute for Safety Problems of NPPs of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005; 50-77. (rus).
12. Solovyova S.P. *Accidents and incidents at nuclear power plants. Training manual*. Obninsk, 1992; 134-273. (rus).
13. IAEA. Accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant report of the Director General. Austria, 2015; 14-127.
14. Arutyunyan R.V., Bolshov L.A., Borovoy A.A., Velikhov E.P. *System analysis of the causes and consequences of the accident at the Fukushima-1 NPP*. Moscow, 2018; 408. (rus).
15. Prister B.S., Klyuchnikov A.A., Baryakhtar V.G., Shestopalov V.M., Kukhar V.P. Problems of nuclear power engineering safety. Chernobyl, 2016; 71-77. (rus).
16. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 666(2):022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
17. Titov S.A., Barbin N.M., Zubarev I.A., Kobelev A.M. Emergency situations at nuclear power plants in the USA, Russia and in the countries of Western Europe for the period 1972–1982. *Complex problems of technosphere safety. Campaign "My City is Getting Ready": Tasks, Problems, Prospects: a collection of articles based on the materials of the XVI International Scientific and Practical Conference (Voronezh, October 1-31, 2020).* Voronezh, 2020; 256-258. (rus).
18. Kobelev A.M., Barbin N.M., Terentyev D.I., Zubarev I.A., Titov S.A. Environmental impacts when possible beyond design basis accidents at nuclear power plants with reactors of type RBMK-1000 and the EGP-6. *Complex problems of technosphere safety. Campaign "My City is Getting Ready": Tasks, Problems, Prospects: a collection of articles based on the materials of the XVI International Scientific and Practical Conference (Voronezh, October 1-31, 2020).* Voronezh, 2020; 391-394. (rus).
19. Dhillon B.S. *Safety, Reliability, Human Factors, and Human Error in Nuclear Power Plants*. CRC Press, 2017; 62-88. DOI: 10.1201/b22260
20. Yakovlev R.M., Obukhova I.A. Towards safe nuclear energy. *Biosphere*. 2017; 9(2):123-135. DOI: 10.24855/biosfera.v9i2.354 URL: http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/354 (rus).
21. *IAEA. Safety of nuclear power plant design*. Vienna, 2016; 116.
22. *IAEA. Assessment of the state of development of the national nuclear infrastructure of the IAEA*. Vienna, 2009. NG-T-3.2; 82.
23. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V. How much is the fire "cost" in the modern world? *Fire and Explosion Safety/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).

Поступила 15.06.2021, после доработки 10.07.2021;
принята к публикации 27.07.2021
Received January June 15, 2021; Received in revised form July 10, 2021;
Accepted July 27, 2021

Информация об авторах

БАРБИН Николай Михайлович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; SPIN-код: 9179-6428; Author ID: 31647; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

ТИТОВ Станислав Андреевич, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; SPIN-код: 1014-7850; Author ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

КОБЕЛЕВ Антон Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; SPIN-код: 5626-9389; Author ID: 759170; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolai M. BARBIN, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; SPIN-Code: 9179-6428; Author ID: 31647; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Stanislav A. TITOV, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation; SPIN-Code: 1014-7850; Author ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

Anton M. KOBELEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation; SPIN-код: 5626-9389; Author ID: 759170; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 76–83
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):76-83

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 614.842.47
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.76-83

Тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации

Анатолий Николаевич Членов ✉, **Татьяна Анатольевна Буцынская**

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приборы приемно-контрольные являются основными техническими средствами, формирующими на объекте систему (установку) пожарной сигнализации. Их задачами являются сбор информации от пожарных извещателей о состоянии объекта, ее анализ и обработка, а также передача и отображение в заданном виде пользователю. Технические возможности приборов приемно-контрольных постоянно расширяются, отображая уровень развития технического прогресса и рост требований к обеспечению пожарной безопасности.
Цели и задачи. Целью статьи выступает анализ состояния и тенденций развития приборов приемно-контрольных пожарных, обеспечивающий повышение пожарной безопасности защищаемых объектов. Задачи включают в себя ретроспективный обзор основных тактико-технических характеристик приборов пожарной сигнализации за период с начала 1950-х годов по настоящее время в России, а также анализ динамики предложения их на рынке средств пожарной автоматики.
Методы. Использованы методы системного анализа и математической статистики.
Результаты и обсуждение. Выделены основные этапы развития в России приборной техники для систем пожарной сигнализации, связанные с развитием технического прогресса, прежде всего радиоэлектроники, и социально-экономическими преобразованиями в стране. Приведены результаты статистических исследований, проведенных авторами, характеризующие изменение российского рынка на основе сравнительных сведений об отечественных и зарубежных средствах сигнализации. Определены основные тенденции развития номенклатуры и технических параметров приборов за анализируемый период. Рассмотрена обобщенная структурная схема блочно-модульного прибора приемно-контрольного пожарного и определены требования к параметрам связи функциональных модулей, обеспечивающие надежность системы пожарной сигнализации.
Выводы. Основные тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации связаны с применением новых коммуникационных технологий и средств микроэлектроники, обеспечивающих решение задач комплексной безопасности с учетом приоритетов требований противопожарной защиты. Динамика совершенствования тактико-технических характеристик приборов в полной мере отражает состояние и тенденции развития в России пожарной автоматики.

Ключевые слова: противопожарная защита; пожарная автоматика; система обнаружения пожара, техническое средство сбора и обработки информации, управление в системе пожарной безопасности

Для цитирования: *Членов А.Н., Буцынская Т.А.* Тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 76–83. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.76-83

✉ Членов Анатолий Николаевич, e-mail: chlenov@mail.ru

Trends in the development of fire alarm system controllers for fire alarm systems

Anatoliy N. Chlenov ✉, **Tatiana A. Butcinskaya**

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

ABSTRACT

Introduction. Fire alarm system controllers are the main technical aids that serve as the backbone of a fire alarm system (a unit) at a facility. They consolidate fire alarm messages, coming from fire detectors, analyze, process, and deliver them to the user and display them in the pre-set format. The technical capacity of fire alarm system controllers is constantly improving in line with the technical progress and tightening fire safety requirements.
Aims and purposes. The purpose of the article is to analyze the state of and trends in the development of fire alarm system controllers, that improve the fire safety of protected facilities. The task encompasses the retrospective review of principal tactical and technical characteristics of fire alarm devices for the period

© А.Н. Членов, Т.А. Буцынская, 2021

starting from the early 1950s to the present time in Russia, as well as the statistical analysis of the pace of their supply on the market of automatic fire fighting systems.
Methods. Methods of system analysis and mathematical statistics were used.
Results and discussion. The main stages of development of instruments for fire alarm systems that are reflective of the technical progress, primarily in the field of radio electronics, as well as the socio-economic transformations in Russia are specified. The article presents the results of statistical studies, carried out by the co-authors at different times and characterizing a change in the Russian market based on the comparative data on domestic and foreign alarm systems. The main trends in the development of the product mix and technical specifications of devices during the analyzed period are identified. The co-authors focus on the generalized layout of a block-modular apparatus of a fire alarm system controller and determine the requirements for communication between functional modules to ensure the reliable operation of a fire alarm system.
Conclusions. The main trends in the development of fire alarm system controllers, designated for fire alarm systems, focus on the application of new communication technologies and microelectronic devices that solve comprehensive safety problems with regard for the top-priority requirements of fire safety. The pace of improvement of tactical technological characteristics of devices is reflective of the state of and trends in the development of automatic fire fighting systems in Russia.

Keywords: fire protection; automatic fire fighting systems; fire detection system; information collection and processing unit; fire safety system management

For citation: *Chlenov A.N., Butcinskaya T.A.* Trends in the development of fire alarm system controllers for fire alarm systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):76-83. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.76-83 (rus).

✉ Anatoliy Nikolaevich Chlenov, e-mail: chlenov@mail.ru

Введение

Приборы приемно-контрольные пожарные (ППКП) являются основными техническими средствами, формирующими на объекте систему (установку) пожарной сигнализации (СПС). Их задачами являются сбор информации от пожарных извещателей о состоянии объекта, ее анализ и обработка, а также передача и отображение в заданном виде пользователю. Технические возможности ППКП постоянно расширяются, отображая уровень развития технического прогресса и рост требований к обеспечению пожарной безопасности.

Целью статьи является анализ состояния и тенденций развития приборов приемно-контрольных пожарных в России. Представлен ретроспективный обзор основных тактико-технических характеристик приборов пожарной сигнализации за период с начала 1950-х годов по настоящее время в России, а также анализ динамики предложения их на рынке средств пожарной автоматики.

Этапы развития ППКП

Можно выделить несколько этапов развития в России приборной техники для систем пожарной сигнализации. Наличие и временные рамки этапов связаны с развитием технического прогресса, прежде всего радиоэлектроники, и социально-экономическими преобразованиями в стране [1–4].

Первый этап связан с выделением систем пожарной сигнализации в самостоятельное направление техники автоматической противопожарной защиты. Первые приборы на основе механических и электромеханических устройств появились в начале XX в. [1]. В простейшей системе сигнализации с элементарной логикой работы электроконтактные извещатели подключались параллельно в сигнальную линию и в дежурном режиме работы были разомкнуты. При срабатывании извещателя его контакты замыкались, включая цепь питания электрической сигнальной лампы. Впоследствии узел коммутации сигнализации выделился в отдельный конструктивно законченный блок, функции которого постепенно расширялись [2].

Развитие разработки и применения ППК в СССР началось в середине 1960-х годов. В первых приборах, например «Сигнал», нормально-замкнутые выходные контакты извещателей последовательно соединялись между собой и образовывали замкнутую электрическую цепь — шлейф сигнализации (ШС), целостность которой контролировалась прибором.

На смену им пришли приборы «Сигнал-2», «Сигнал-3», «Сигнал-3М». Они были выполнены с применением реле. Их электропитание осуществлялось непосредственно от сети переменного тока через гасящие сопротивления. Кроме этого, в приборе «Сигнал-2» отсутствовал выход во внешнюю сигнальную цепь, не ограничивалось по времени включение в тревожный режим оповещателя. В приборе «Сигнал-3» сигнализация осуществлялась не одним, а двумя световыми оповещателями. В дежурном режиме непрерывно светилась синяя сигнальная лампа, в режиме тревоги включалась красная лампа, а синяя при этом выключалась.

Однако уже в приборе «Сигнал-3М» были введены многие функции, характерные для последующего поколения приборов малой информационной емкости:

- контроль ШС на обрыв и короткое замыкание;
- сдача объекта под охрану без формирования сигнала тревоги (по тактике «с открытой дверью»);

- свечение светового оповещателя ровным светом в дежурном режиме и мигание в режиме тревоги;
- фиксирование сигнала тревоги при нарушении ШС;
- наличие релейного выхода на пульт сигнализации.

Наиболее совершенными представителями приборов этого поколения были «Сигнал-3М-1» и «Сигнал-31». Практика эксплуатации данных приборов подтвердила их высокую эффективность и тем самым обусловила массовое использование на объектах народного хозяйства в течение длительного периода времени.

Одновременно с ними совершенствовались и ППКП большой информационной емкости — концентраторы, станции и пульты пожарной сигнализации. Наиболее распространенными приборами этого периода времени были ТЛО, ТОЛ-10/100, ППС-1 [4]. В приборе ППС-1 применялся ряд новых тактико-технических особенностей, в частности, формирование стартового импульса запуска автоматических установок пожаротушения при срабатывании двух ПИ, установленных в одном защищаемом помещении, что существенно повысило эффективность эксплуатации систем пожарной сигнализации на различных объектах.

На втором этапе с начала 1980-х годов основным направлением совершенствования приборов явилось повышение их надежности и помехозащищенности [4].

Имеющееся в ряде случаев низкое качество питающих сетей переменного тока, частые пропадания напряжения сети, пониженное его значение определили расширение диапазона питающих напряжений приборов, а также применение защиты от электрических и электромагнитных наводок в шлейфе. Началось использование методов резервирования питания или за счет энергетических возможностей линии пульта централизованного наблюдения (например, в приборах «Сигнал-39»), или за счет подключения резервного источника постоянного тока (например, в приборах УОТС-1, УОТС-1-1) [4]. Отдельное направление составили приборы, использующие принцип построения, при котором в случае пропадания напряжения сети ШС с помощью контактов реле напрямую переключался к линии пульта централизованного наблюдения («Сигнал-37», «Сигнал-37А», «Сигнал-37М», «Сигнал-СПИ»).

Кроме этого, дефицит специальных экранированных, многожильных проводов обусловил поиск методов контроля шлейфа, которые сочетали бы высокую помехозащищенность прибора с повышенной нагрузочной способностью шлейфа для питания токопотребляющих охранных и активных пожарных извещателей при использовании обычных двухжильных проводов типа ТРП, ТРВ. Значительным шагом в повышении помехозащищенности приборов явилась оптимизация величины задержки времени формирования им сигнала тревоги.

Одним из первых приборов, в котором были реализованы все перечисленные выше технические усовершенствования, являлся прибор УОТС-М. Прибор использовал импульсный метод контроля шлейфа, нагруженного на электрический конденсатор при его двухступенчатой коммутации. Часть блоков прибора образуют унифицированный модуль контроля ШС, который без существенных изменений использовался для построения приборов средней и большой информационной емкости.

В УОТС-М обеспечивался контроль шлейфа при любых значениях сопротивления его проводников до 1 кОм и сопротивления утечки между ними более 20 кОм. При этом обрыв любого проводника ШС с сопротивлением в месте обрыва более 20 кОм или замыкание проводников шлейфа с переходным сопротивлением в месте замыкания до 1 кОм определялись как нарушение, и по линии связи на ПЦН передавалось извещение «Тревога». Если в результате самопроизвольного ухудшения параметров шлейфа его сопротивление изменялось в диапазоне от 1 до 19,5 кОм и(или) сопротивление утечки изменялось в диапазоне от 3 до 20 кОм, прибор определял неисправность шлейфа и по дополнительной линии связи передавал на пульт централизованного наблюдения извещение «Внимание». Контроль состояния ШС при этом сохранялся, и при срабатывании любого из установленных в шлейф извещателей, в том числе токопотребляющих, прибор формировал извещение «Тревога». Прибор был защищен от электрических синусоидальных наводок и импульсных помех высокого напряжения в ШС, имелась возможность резервирования его питания источником постоянного тока, без которого прибор выдерживал пропадания напряжения питания длительностью до 250 мс. Кроме этого, в приборе УОТС-М осуществляется непрерывный контроль работоспособности его основных блоков [5].

Началом третьего этапа развития ППКП в России можно считать последние годы прошлого столетия. В это время в нашей стране начали происходить существенные изменения в области разработки и производства систем тревожной сигнализации.

Основной причиной таких изменений следует считать освоение российскими производителями передовых технологий изготовления средств автоматики — введение автоматического поверхностного печатного монтажа с применением безвыводных радиоэлементов. Это существенно повысило качество производимых технических средств, а следовательно, их конкурентоспособность на российском рынке с аналогичными импортными изделиями.

Применение малопотребляющих микроконтроллеров и микроЭВМ позволило не только повысить надежность, уменьшить массогабаритные показатели, но и за счет увеличения объема обрабатываемой информации в приборах повысить их информационную емкость и информативность.

По результатам проведенного нами статистического анализа к концу первого десятилетия XXI в. [5] значительно увеличилась доля адресных ППКП. Заметно возросло количество отечественных универсальных приборов, совмещающих в себе функции ППКП как для пожарной сигнализации, так и управления установками пожарной автоматики.

По данным [6] в этот период все ведущие фирмы уже используют радиоканал в своих разработках для связи с извещателями и другими элементами систем сигнализации. По мнению более 65 % экспертов [6], в ближайшие годы объем продаж радиоканальных систем в России будет возрастать.

При организации резервирования электропитания вместо применявшихся ранее электробатарей повсеместным стало использование встроенных герметичных аккумуляторов, блоков бесперебойного и резервного питания.

Наметилось увеличение информативности за счет применения встроенных индикаторов и выносных панелей. Появились «расширяемые» ППКП, имеющие гибкую структуру, позволяющую наращивать информативную емкость (количество контролируемых ШС), и реализующие возможность объединения нескольких приборов в одну систему. Такие приборы стали успешно использоваться при обеспечении безопасности новых или реконструированных зданий или их части с поэтапным вводом в эксплуатацию.

Перечисленные тенденции были закреплены в принятых нормативных документах, определивших дальнейшее развитие ППКП [7–9], в частности, в ГОСТ 53325–2012 «Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Технические требования и методы испытаний»[1].

Можно выделить следующие тенденции данного этапа развития приборов.

1. Унификация схемотехнической реализации приборов, что привело к выпуску серий однотипных приборов различной информационной емкости.

2. Расширение функциональных возможностей, широкое использование программирования параметров и режимов работы.

3. Переход к блочно-модульной конструкции приборов с возможностью наращивания информационной емкости.

4. Рост количества отечественных комбинированных универсальных средств контроля и управления, позволяющих использовать их как для сигнализации, так и для управления различными установками пожарной автоматики.

5. Производство значительного количества модификаций приборов, облегчающее выбор прибора для конкретного защищаемого объекта.

Можно утверждать, что к середине второго десятилетия XXI в. номенклатура и качество отечественных разработок ППКП в целом не уступали зарубежным аналогам [10–17].

Современные требования к ППКП

В 2019 г. принята окончательная редакция межгосударственного стандарта «Приборы приемно-контрольные пожарные. Приборы управления пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний». Данный документ отражает современные требования к данному виду техники пожарной сигнализации.

Общая классификация ППКП показана на рис. 1. Обобщенная структурная схема прибора представлена на рис. 2.

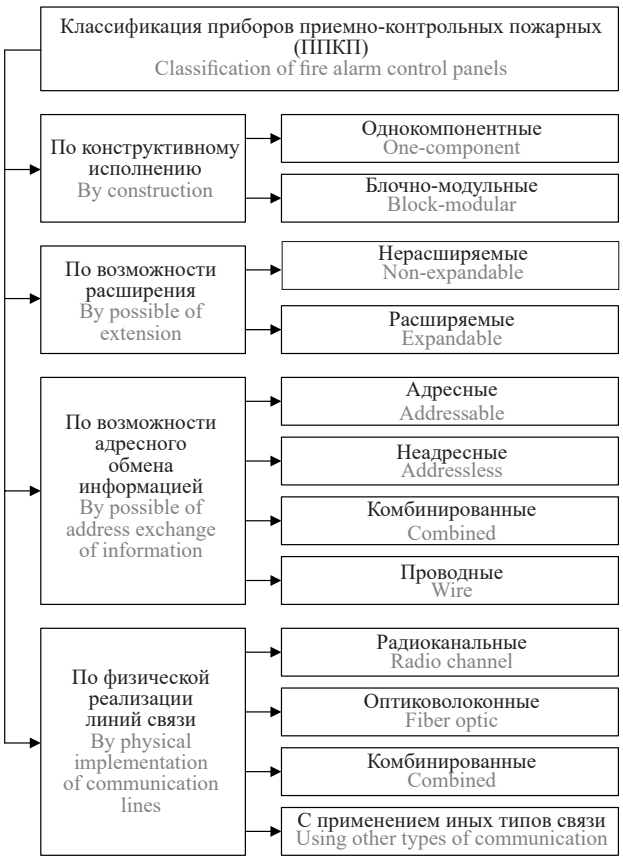


Рис. 1. Общая классификация ППКП

Fig. 1. General classification of fire alarm system controllers (FASC)

[1] ГОСТ 53325–2012.Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Технические требования и методы испытаний : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2012 г. № 1028-ст.

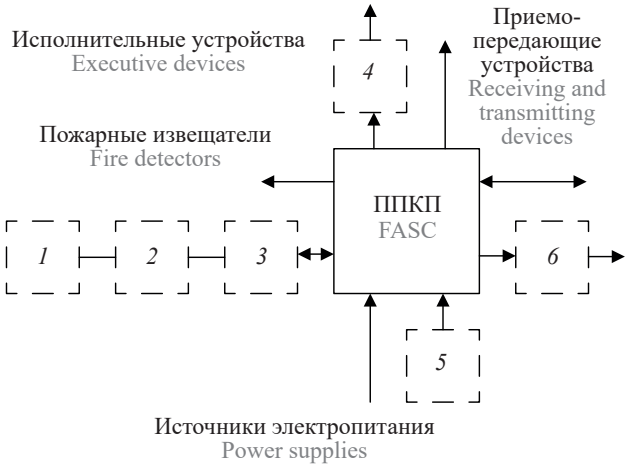


Рис. 2. Обобщенная структурная схема прибора приемно-контрольного пожарного: ППКП — однокомпонентный приемно-контрольный прибор (центральный модуль, контрольная панель); *1–6* — функциональные модули

Fig. 2. A generalized structural block diagram of a fire alarm system controller (FASC): one-component reception and control device (central module, control panel); *1–6* — functional modules

Пунктиром обозначены возможные подключаемые к базовому блоку модули, выполняющие отдельную функцию или набор функций блочно-модульного прибора, а также обеспечивающие расширение его функциональных возможностей. В соответствии с рис. 2, можно выделить четыре основных направления («стыка») ППКП с внешними элементами, составляющими СПС.

Первый стык «прибор – пожарные извещатели» обеспечивает связь ППКП с пожарными извещателями для получения информации о состоянии защищаемого объекта. Такая связь может быть односторонней — от ПИ к прибору, или двухсторонней при передаче команд для управления режимом его работы или характеристиками передаваемых извещений

Параметры стыка существенно зависят от физической реализации линий связи и способа их контроля и обмена информацией с ПИ, в том числе от возможности адресного обмена информацией.

Структура формируемых линий связи прибора с ПИ подразумевает значительное количество вариантов построения [18, 19]. Основными (базовыми) вариантами являются (рис. 3, *а*) линейная, радиальная и кольцевая структуры. Второй уровень образуют варианты совмещения базовых структур «по два из трех» (рис. 3, *б*), учитывая комбинации размещения с повторениями.

В общем случае для структур любой сложности выражение для общего количества вариантов V имеет вид:

$$V = n^m = 3^m,$$

где n — общее количество базовых структур, в нашем случае $n = 3$;

m — количество базовых структур в комбинации.

Малыми кругами обозначены вспомогательные устройства, обеспечивающие соединение и разветвление проводных линий, а в ряде случаев — выполнение дополнительных функций, например, формирование адреса.

Широкое распространение получили ППКП с кольцевым шлейфом сигнализации, в который подключаются модули контроля с линейными или радиальными ШС. Для современных приборов большой информационной емкости возможно одновременное использование нескольких структурных комбинаций линейной части.

Особенностью современного нормативного подхода является то, что предельно допустимые электрические характеристики проводной линии связи с пожарными извещателям, а также другие параметры линий связи, необходимые для сохранения работоспособности ППКП, не определяются количественно, но должны быть указаны в технической документации конкретного типа ППКП или модуля контроля.

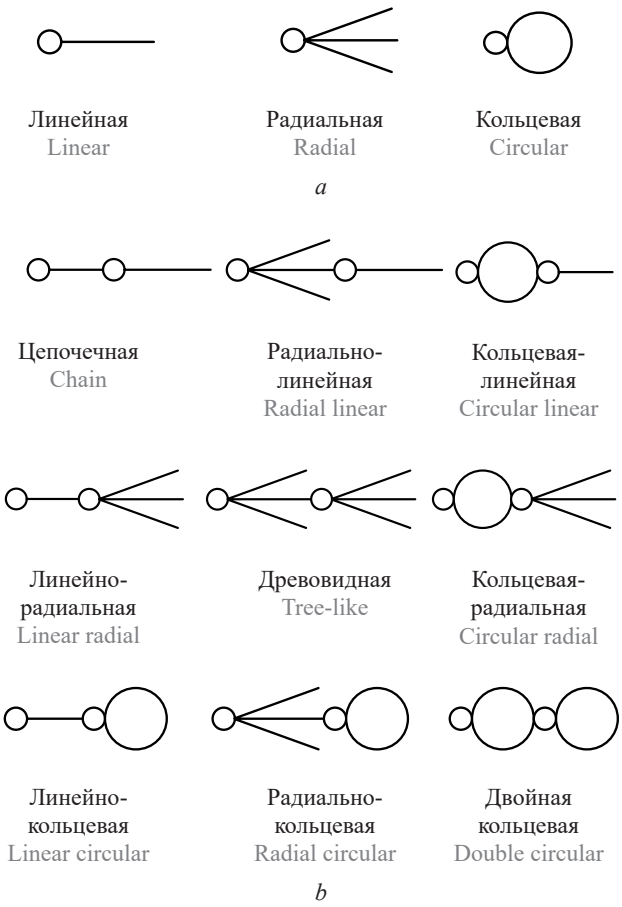


Рис. 3. Базовые структуры первого уровня (*а*) и структурные комбинации линейной части системы пожарной сигнализации второго уровня (*b*)

Fig. 3. Basic structures of the first level (*a*) and structural combinations of the linear component of a second-level fire alarm system (*b*)

Второй стык: прибор – исполнительные устройства. В качестве исполнительных устройств могут выступать компоненты прибора (модули), обеспечивающие световую и(или) звуковую сигнализацию режимов работы ППКП.

Звуковая сигнализация должна обеспечиваться встроенным в функциональный модуль (компонент прибора, прибор) источником звука.

Параметры цепей для формирования выходных сигналов управления должны быть приведены в технической документации (ТД) на прибор.

Третий стык: прибор – внешние приемо-передающие устройства. Этот стык обеспечивает формирование и передачу извещений ППКП, а также прием информационно-управляющих сигналов.

В качестве внешних приемо-передающих устройств могут выступать другие ППКП, система передачи извещений, коммуникаторы различного вида и т.п.

ППКП могут быть оборудованы различными типами интерфейсов для подключения внешних устройств: релейные выходы (сухие контакты или открытый коллектор), RS 232, Ethernet. RS 485.

Четвертый стык: прибор – источники электропитания обеспечивает бесперебойное электропитание в соответствии с требованием надежности электроснабжения по первой категории.

Следует отметить важную тенденцию современного этапа — усиление требований надежности и безопасности ППКП и СПС на их основе [20, 21]. Так, в ППКП должен быть предусмотрен, как минимум, один контролируемый дискретный вход для принятия сигнала о неисправности от внешних технических средств, взаимодействующих с прибором (системы передачи извещений, блоки бесперебойного питания и. т.д.).

Существенному повышению функциональной надежности также способствуют:

- контроль работоспособности функциональных блоков, линий связи и минимизация потерь при их неисправности;
- ведение четырех уровней доступа ППКП;
- минимизация функций ППКП, не связанных с противопожарной защитой.

Выводы

Предстоящее вступление в действие межгосударственного стандарта можно рассматривать как начало четвертого этапа развития приемно-контрольных приборов, который будет проходить под знаком внедрения новых коммуникационных технологий и средств микроэлектроники, обеспечивающих решение задач комплексной безопасности с учетом приоритетов требований противопожарной защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пашинцев В.* История систем пожаротушения и сигнализации: от деревянных колотушек до современных автоматических устройств // Системы безопасности. 2020. № 4 (154). С. 94–96. URL: https://www.secuteck.ru/articles/istoriya-sistem-pozharotusheniya-i-signalizacii-ot-derevyannyh-kolotushek-do-sovremennyh-avtomaticheskih-ustrojstv
2. *Членов А.Н., Бахтин А.А., Дубинин Ю.П., Хохлов Ю.П.* Состояние и перспективы развития объектовых приемно-контрольных приборов // Извещатели, приборы и системы охранной и пожарной сигнализации : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО МВД СССР, 1987.
3. *Буцынская Т.А.* Анализ развития рынка технических средств пожарной сигнализации в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2006. Т. 15. № 3. с. 67–69. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razvitiya-rynka-tehnicheskih-sredstv-pozharnoy-signalizatsii-v-rossii
4. *Собурь С.В.* Установки пожарной сигнализации : учеб.-справ. пособие. 8-е изд. М. : ПожКнига, 2019. 248 с.
5. *Кирюхина Т.Г., Членов А.Н., Буцынская Т.А., Шакирова А.Ф.* Приемно-передающие устройства электронных систем безопасности. М. : НОУ «Институт электронных систем безопасности», 2010. 264 с.
6. *Левчук М., Горяченков М., Тереньтьев Д., Климов К., Тараненко Д., Дьяченко С.* Радиоканальные системы: совершенствование технологий способствует востребованности. Мнения экспертов // Системы безопасности. 2020. № 5 (155). с. 88–96. URL: https://www.secuteck.ru/articles/radiokanalnye-sistemy-sovershenstvovanie-tekhnologij-sposobstvuet-vostrebovannosti
7. *Белокобыльский А.В., Рыбаков И.В., Грачева А.Н., Ткачев Н.М., Рыбакова О.Н.* Формирование нормативной базы к ТС пожарной автоматики на пространстве евразийского экономического союза // Алгоритм безопасности. 2018. № 6. С. 4–5.
8. *Бородулин Е.Н., Скрипник И.Л., Воронин С.В.* Подходы к созданию современных приборов приемно-контрольных пожарных // Проблемы управления рисками в атмосфере. 2018. № 2. С. 105–110.

9. *Антоненко А.А*., *Буцынская Т.А*., *Членов А.Н*. Нормативное обеспечение систем комплексной безопасности объектов // Технологии техносферной безопасности. 2010. Вып. 2 (30). Ст. 11. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-2/11-02-10.ttb.pdf
10. *Yung Mark.* Der "Stern von Segdung". Abläufe mit Brandschutzvorrichtung in ADAC-Zentrale // Fachmedium TGA-Branche. 2014. Vol. 45. No. 3. pp. 60–67.
11. *Willhauck Roland, Barthelmes Dirk*. Austausch der Alarmienungtechnik im Stand- und Landkreis Karlsruhe // Brandschutz. 2014. Vol. 68. No. 9. Pp. 682–688.
12. Brandtmeldetechnik fur kleine bismittelgrose. Anwendungen // BauPortal. 2016. Vol. 128. No. 7. P. 68.
13. *Tian Shuren.* The desing of intelligent electrical fire alarm system based on neural network // Xiaofang Kexue yu Jishu/Fire Sci. and Technol. 2015. Vol. 34. No. 39. Pp. 1201–1204.
14. *Ting Ying-Yao, Hsiao Chi-Wei, Wang Huan-Sheng.* A data fusion-based fire detection system // IEICE Transactions on Information and Systems. 2018. Vol. 101. No. 4. Pp. 977–984. DOI: 10.1587/transinf.2016IIP0005
15. *Deng Liwen, Liu Xiaojun.* Intelligent fire detection method based on fuzzy neural network // Xiaofang Kexue yu Jishu/Fire Sci. and Technol. 2019. Vol. 38. No. 4. Pp. 522–525.
16. *Lu Xin, Cao Jiangtau, Ji Xiaofei, Oin Yueyan*. Desing of fire monitoring system based on multi-features // Lianoning shiyou huagong daxue xuebao. J. Lianoning chihua Univ. 2019. Vol. 39. No. 1. Pp. 90–96.
17. "Hekatron Remote" — Fernzugriff auf Brandmeldeanlagen // Brandschutz. 2015. Vol. 69. No. 12. P. 1074.
18. *Буцынская Т.А.* Обобщенная структура построения линейной части систем тревожной сигнализации // Системы безопасности – 2006 : мат. 15-й междунар. науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2006. С. 80–83.
19. *Мишук Д.М.* Сравнительный анализ различных структур построения пожарных шлейфов и расчет вероятности безотказной работы // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири : мат. междунар. академ. конф. Тюмень : Тюм. индустр. ун-т, 2018. С. 270–274.
20. *Зайцев А.В.* Зоны контроля пожарной сигнализации и алгоритмы управления системами противопожарной автоматики // Алгоритм безопасности, 2019. № 1. С. 56–59.
21. *Зайцев А.В.* Зоны контроля пожарной сигнализации и работа в условиях единичной неисправности // Пожарная безопасность. Специализированный каталог – 2021. М. : Гротек, 2021. С. 69–72.

REFERENCES

1. Pashintsev V. The history of fire extinguishing and alarm systems: from wooden mallets to modern automatic devices. *Sistemy bezopasnosti/Security and Safety*. 2020; 4(154):94-96. URL: https://www.secuteck.ru/articles/istoriya-sistem-pozharotusheniya-i-signalizacii-ot-derevyannyh-kolotushek-do-sovremennyh-avtomaticheskih-ustrojstv (rus).
2. Chlenov A.N., Bakhtin A.A., Dubinin Yu.P., Khokhlov Yu.P. State and development prospects of facility control and monitoring devices. *Detectors*, *devices and systems of security and fire alarms* : *collection of scientific papers*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Internal Affairs of USSR Publ., 1987.
3. Butcinskaya T.A. Analysis of the development of the market for technical means of fire alarm in Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(3):67-69. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razvitiya-rynka-tehnicheskih-sredstv-pozharnoy-signalizatsii-v-rossii (rus).
4. Sobur S.V. *Fire alarm installations: study guide*. 8th ed. Moscow, Pozhkniga Publ., 2019; 248. (rus).
5. Kiryukhina T.G., Chlenov A.N., Butcinskaya T.A., Shakirova A.F. *Receiving and transmitting devices of electronic security systems.* Moscow, Institute of Electronic Security Systems Publ., 2010; 264. (rus).
6. Levchuk M., Goryachenkov M., Terentiev D., Klimov K., Taranenko D., Dyachenko S. Radio channel systems: improving technologies contributes to the demand. Expert opinions. *Sistemy bezopasnosti/Security and Safety*. 2020; 5(155):88-96. URL: https://www.secuteck.ru/articles/radiokanalnye-sistemy-sovershenstvovanie-tekhnologij-sposobstvuet-vostrebovannosti (rus).
7. Belokobyl'skiy A.V., Rybakov I.V., Gracheva A.N., Tkachev N.M., Rybakova O.N. Formation of the regulatory framework for the TS of fire automatics in the space of the Eurasian economic union. *Algoritm bezopasnosti/Security Algorithm*. 2018; 6:4-5. (rus).
8. Borodulin E.N., Skripnik I.L., Voronin S.V. Approaches to the creation of modern fire alarm control devices. *Problems of technosphere risk management*. 2018; 2:105-110. (rus).

9. Antonenko A.A., Butcinskaya T.A., Chlenov A.N. Regulatory support of systems integrated safety of objects. *Technology of technosphere safety*. 2010; 2(30):11. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-2/11-02-10.ttb.pdf (rus).
10. Yung Mark. Der "Stern von Segdung". Ablaufe mit Brandschutzvorrichtung in ADAC-Zentrale. *Fachmedium TGA-Branche*. 2014; 45(3):60-67. (ger).
11. Willhauck Roland, Barthelmes Dirk. Austausch der Alarmienungtechnik im Stand- und Landkreis Karlsruhe. *Brandschutz*. 2014; 68(9):682-688. (ger).
12. Brandtmeldetechnik fur kleine bismittelgrose. Anwendungen. *BauPortal*. 2016; 128(7):68. (ger).
13. Tian Shuren. The desing of intelligent electrical fire alarm system based on neural network. *Xiaofang kexie yu jishu*. *Fire Sci. and Technol*. 2015; 34(39):1201-1204.
14. Ting Ying-Yao, Hsiao Chi-Wei, Wang Huan-Sheng. A data fusion-based fire detection system. *IEICE Transactions on Information and Systems.* 2018; 101(4):977-984. DOI: 10.1587/transinf.2016IIP0005
15. Deng Liwen, Liu Xiaojun. Intelligent fire detection method based on fuzzy neural network. *Xiaofang Kexue yu Jishu*. 2019; 38(4):522-525.
16. Lu Xin, Cao Jiangtau, Ji Xiaofei, Oin Yueyan. Desing of fire monitoring system based on multi-features. *Lianoning shiyou huagong daxue xuebao*. J. Lianoning chihua Univ. 2019; 39(1):90-96.
17. "Hekatron Remote" — Fernzugriff auf Brandmeldeanlagen. *Brandschutz*. 2015; 69(12):1074. (ger).
18. Butcinskaya T.A. Generalized structure of building the linear part of alarm systems. *Proceedings of 15th International Scientific-Technical Conference "Safety Systems – 2006"*. Moscow, Academy of the State Fire Service Emercom of Russia, 2006; 80-83. (rus.).
19. Mishuk D.M. Comparative analysis of various structures for constructing fire loops and calculating the probability of failure-free operation. *Proceedings of International academic Conference "State, trends and problems of development of oil and gas potential of Western Siberia"*. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2018; 270-274 (rus.).
20. Zaytsev A. Fire alarm control zones and control algorithms for fire control systems. *Algoritm bezopasnosti* / *Security Algorithm*. 2019; 1:56-59 (rus).
21. Zaytsev A. Fire alarm control zones and operation under single fault conditions. Pozharnaia bezopasnost. *Spetcializirovannyi katalog – 2021/Fire safety. Specialized catalog – 2021*. Moscow, Grotek Publ., 2021; 69-72. (rus).

Поступила 3.03.2021, после доработки 11.08.2021;
принята к публикации 1.10.2021
Received March 3, 2021; Received in revised form August 11, 2021;
Accepted October 1, 2021

Информация об авторах

ЧЛЕНОВ Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры пожарной автоматики, 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: 474756; ORCID: 0000-0002-9774-1504; e-mail: chlenov@mail.ru

БУЦЫНСКАЯ Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доцент; старший научный сотрудник Учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 631650; ORCID: 0000-0002-4859-9011;e-mail: butcinskaya@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Anatoliy N. CHLENOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Worker of Higher Education of Russian Federation, Professor of Department of Fire Automation, 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: 474756; ORCID: 0000-0002-9774-1504; e-mail: chlenov@mail.ru

Tatiana A. BUTCINSKAYA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; Senior Researcher of the Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 631650; ORCID: 0000-0002-4859-9011; e-mail: butcinskaya@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):84-97

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4:539
https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97

Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами

Илья Андреевич Пустовалов ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования было изучение влияния одного из видов углеродных наноструктур, астраленов, на процессы тушения пламени нефтепродуктов тонкораспыленной водой.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования являются огнетушащие суспензии, применяемые в модульных установках пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) для тушения пожаров нефтепродуктов. В качестве исследуемого огнетушащего вещества использовалась дистиллированная вода, модифицированная астраленами с концентрацией наноструктур от 0,05 до 1,0 об. %. Экспериментальная часть включала исследование теплофизических характеристик огнетушащих жидкостей: плотности, динамической вязкости, поверхностного натяжения, удельной теплоты парообразования. Также были проведены исследования по определению скорости испарения, распределения размеров капель распыленных огнетушащих составов и времени тушения модельного очага возгорания нефтепродуктов.

Результаты исследования. Диспергирование наноструктур в составе огнетушащих жидкостей позволяет увеличить их плотность, поверхностное натяжение на 20,6 %, удельную теплоту парообразования при концентрации астраленов 0,25 и 0,5 об. % и динамическую вязкость при температуре 20 °С на 6,68...15,38 %. Проведены исследования по определению скорости испарения капель модифицированной огнетушащей жидкости. Установлено, что при повышении концентрации наноструктур с 0,05 до 0,5 об. % скорость испарения снижается.

Скорость движения капель возрастает при диспергировании астраленов от 0 до 0,25 об. %, однако, при дальнейшем повышении концентрации астраленов до 1,0 об. % скорость снижается.

Время тушения определялось с использованием лабораторной установки пожаротушения. Распределение размеров капель огнетушащих составов находится в интервале от 20 до 160 мкм.

На установке МУПТВ наибольшая огнетушащая способность достигалась при применении огнетушащего состава с концентрацией астраленов 0,5 об. %.

Выводы. Модифицирование огнетушащего состава углеродными наноструктурами приводит к изменению его теплофизических характеристик. Применение данного состава в составе МУПТВ на объектах с обращением нефтепродуктов комплекса позволит повысить ее огнетушащую способность. Дальнейшими направлениями исследований являются разработка способов стабилизации астраленов в суспензиях и адаптация к условиям низких температур.

Ключевые слова: наножидкости; тушение пожаров; теплофизические характеристики; время тушения; нефтегазовый комплекс

Для цитирования: *Пустовалов И.А.* Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97

✉ Пустовалов Илья Андреевич, e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used

Ilya A. Pustovalov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The aim of the research project is to study the effect produced by one type of carbon nanostructures, or astralenes, on processes of extinguishing oil product flame using finely sprayed water.

© И.А. Пустовалов, 2021

Materials and research methods. The research is focused on fire extinguishing suspensions used in modular water mist installations for the fire extinguishing of oil products. Astralene-modified distilled water, having the volumetric concentration of nanostructures equal to 0.05–1.0 percent, was used as a fire extinguishing substance under research. The experiment was focused on the study of thermophysical characteristics of fire extinguishing liquids, such as density, dynamic viscosity, surface tension, specific heat of vaporization. Also, studies were carried out to identify the rate of evaporation, the distribution of droplet sizes of sprayed fire extinguishing compositions, and the time needed to extinguish the model source of ignition of oil products.

Research results. The dispersion of nanostructures of fire-extinguishing liquids allows to increase their density, surface tension by 20.6 %, increase the specific heat of vaporization if the volumetric concentration of astralenes is equal to 0.25 and 0.5 %, and boost the dynamic viscosity by 6.68–15.38 % at the temperature of 20 °C.

The research was carried out to find the rate of evaporation of droplets of the modified fire-extinguishing liquid. It was found that an increase in the volumetric concentration of nanostructures from 0.05 to 0.5 % causes reduction in the evaporation rate.

The droplet speed increases if the volumetric dispersion of astalenes goes up to 0 to 0.25 %. However, a further increase in the volumetric concentration of astralenes to 1.0 % causes a reduction in their speed.

The extinguishing time was identified using a laboratory fire extinguishing installation. The distribution of droplet sizes of fire-extinguishing compositions is in the range of 20 to 160 microns.

The fire extinguishing capacity of the installation was highest if a fire extinguishing composition had a 0.5 % volumetric concentration of astralenes.

Conclusions. The modification of a fire extinguishing composition by carbon nanostructures leads to a change in its thermophysical characteristics. The addition of this composition to the installation, used at facilities involved in the processing of petroleum products, will increase its fire extinguishing ability. Further areas of research may include the development of astralene stabilization methods for suspensions and adaptation to low temperatures.

Keywords: nanofluids; fire extinguishing; thermophysical characteristics; extinguishment time; oil and gas complex

For citation: Pustovalov I.A. An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):84-97. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97 (rus).

✉ Ilya Andreevich Pustovalov, e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

Введение

Применение тонкораспыленной воды является одним из наиболее экономичных и эффективных способов борьбы с пожарами. Пожары нефтепродуктов характеризуются быстрым развитием, достижением высоких температур (1100 °С), а также риском каскадного развития аварийной ситуации. В данных условиях применение модульных установок пожаротушения является технически обоснованным, так как позволяет ликвидировать возгорание на ранней стадии.

При проектировании модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) необходимо учитывать критическую интенсивность тушения пламени нефтепродукта, определяемую выражением (1):

$$I^{*}_{\text{кр}} = 155 m^2 \sqrt[3]{\frac{mD}{\nu\rho}} \left[\frac{\rho T_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}} \left(T_{\text{ср}} - T_0 \right)} - 2 \right]^{-2}, \qquad (1)$$

где m — массовая скорость выгорания топлива, кг/(м^2·с$^{-1}$);

D — средний диаметр капли в струе распыленной воды, мкм.;

ν — кинематическая вязкость жидкости, (м^2/с);

ρ, $\rho_{\text{в}}$ — плотность горючей жидкости и воды, г/см^3;

$T_{\text{к}}$ — температура кипения жидкости, °С;

$T_{\text{ср}}$ — средняя температура поверхности жидкости, °С;

T_0 — температура окружающей среды, °С [1].

Также значение критической интенсивности может быть выражено следующей формулой:

$$I^{m}_{\text{кр}} = cm\left(T_{\text{к}} - T_{\text{т}}\right)/r, \qquad (2)$$

где m — массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м^2·с$^{-1}$);

$T_{\text{к}}$ — температура кипения жидкости, К;

$T_{\text{т}}$ — температура тушения, К;

c — удельная теплоемкость горючей жидкости, Дж/К;

r — удельная теплота парообразования огнетушащего вещества, Дж/кг [2].

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что снижение критической интенсивности возможно за счет уменьшения размеров распыленных частиц, увеличения плотности и удельной теплоты парообразования огнетушащей жидкости. Для этого необходимы модернизация оросителей [3, 4], увеличение давления в системах инициирования, разработка новых способов подачи огнетушащих составов, разработка новых огнетушащих составов [5–7].

Общим недостатком указанных способов модернизации является необходимость разработки новых технологических, конструктивных и организационных решений в системах ППЗ, что в конечном счете негативно сказывается на стоимости МУПТВ. Это снижает их конкурентоспособность на рынке пожарно-технической продукции.

В последние десятилетия при разработке технологических устройств и материалов в сферах энергетики, электроники, пожаротушения большое внимание уделяется созданию рецептур наножидкостей

с улучшенными технологическими характеристиками с использованием углеродных наноструктур в концентрациях до 1…2 об. % [8–10]. Отличительными особенностями наножидкостей являются улучшенные теплофизические характеристики при относительно стабильных показателях реологических свойств [11]. Это позволяет внедрять их в существующие установки и оборудование систем ППЗ производственных объектов.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование влияния астраленов на свойства огнетушащих суспензий, определяющих огнетушащую способность МУПТВ при ликвидации горения нефтепродуктов.

Материалы и методы исследований

Астралены, используемые в качестве наноматериала, диспергированного в дистиллированную воду, получают методом испарения графитовых анодов в электродуговом разряде [12], имеют структуру, состоящую из изогнутых графитовых слоев, диаметром 10…150 нм, с расстоянием между слоями графена 0,336 нм, средний размер пор — 20…60 нм. Астралены характеризуются высокой термической устойчивостью и в порошкообразном виде представляют собой крупные агломераты размером порядка 0,5…3 мкм [13].

Подготовка суспензий (см. таблицу) проводилась путем диспергирования углеродных наноструктур (УНС) с объемной концентрацией 0,05…1,0 об. % в суспензии DW при воздействии источника ультразвука (мощность — 1,2 кВт, частота — 50…60 Гц, время обработки — 30 мин).

Определение *плотности* огнетушащих суспензий проводилось пикнометрическим методом, согласно ГОСТ 18995.1–73[1]. Использовался стеклянный пикнометр типа ПЖ-2-100 КШ 10/19, соответствующий требованиям ГОСТ 22524–77[2], объемом 100 мл марки АИ-95.

Определение *динамической вязкости* осуществлялось методом капиллярной вискозиметрии, согласно ГОСТ 33768–2015[3]. Использовался стеклянный капиллярный вискозиметр тип ВПЖ-2 с диаметром капилляра 0,56 мм, соответствующим требованиям ГОСТ 10028–81[4].

Определение *коэффициента поверхностного натяжения* проводилось сталагмометрическим методом, согласно ГОСТ 8433–81[5]. Использовался стеклянный сталагмометр с впаянным капилляром диаметром 0,5 мм.

Определение удельной теплоты парообразования осуществлялось методом автоклавирования [14].

[1] ГОСТ 18995.1–73 (СТ СЭВ 1504–79). Продукты химические жидкие. Методы определения плотности (с Изменениями № 1, 2) : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 17 июля 1973 г. № 1740.

[2] ГОСТ 22524–77. Пикнометры стеклянные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3) : введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 мая 1977 г. № 1178.

[3] ГОСТ 33768–2015. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (с Поправкой) : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 10 декабря 2015 г. № 48).

[4] ГОСТ 10028–81. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 мая 1981 г. № 2461.

[5] ГОСТ 8433–81. Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 февраля 1981 г. № 968.

Условные обозначения огнетушащих составов

Arbitrary symbols of fire extinguishing compositions

Условное обозначение The symbol	Тип огнетушащего вещества (ОТВ) Type of the firefighting agent
DW	Дистиллированная вода Distilled water
DW + Astr. 0,05 об. % DW + Astr. 0,05 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,05 об. % Distilled water with the 0.05 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 0,2 об. % DW + Astr. 0,2 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,2 об. % Distilled water with the 0.2 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 0,5 об. % DW + Astr. 0,5 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,5 об. % Distilled water with the 0.5 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 1,0 об. % DW + Astr. 1,0 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 1,0 об. % Distilled water with the 1.0 % volumetric concentration of astralenes

Определение *размера капель* огнетушащих суспензий осуществлялось путем анализа фотографий потоков капель ОТВ с использованием средств высокоскоростной (не менее 10^3 fps) цифровой фоторегистрации [13]. Далее обрабатывали фрагмент снимка размером 20 000 × 20 000 мкм в программном продукте Image Analysis 3.5 (разработчик — NT-MDT, г. Москва).

Для определения *скорости движения капель* на выходе из оросителя применялась лабораторная установка, представляющая из себя прямоугольный параллелепипед с размерами 0,6 × 0,9 м, выполненный из прозрачного материала (поликарбонатное стекло) и закачной баллон с огнетушащим веществом объемом 5,0 л под давлением 1,21 МПа. Выход огнетушащего вещества осуществлялся через сплинклерный ороситель, предназначенный для формирования капель менее 150 мкм. При помощи высокоскоростной съемки (не менее 10^3 fps) определялась скорость движения капель ОТВ [15].

Определение *скорости испарения капель* огнетушащих суспензий осуществлялось с использованием лабораторной установки, представляющей из себя источник света, тепла, термопару, зафиксированную на штативе, секундомер (рис. 1). На термопаре *3* с помощью дозатора размещали каплю огнетушащей суспензии *4*. Фиксировали на капле излучение светодиодной лампы *1* мощностью 100 Вт. Подносили газовую горелку с пропан-гептановой смесью *5* и высокоскоростной камерой *6*, осуществляли видеофиксацию процесса испарения.

Определение времени тушения модельного очага пожара проводилось в лабораторной установке (рис. 2). Время тушения модельных очагов пожара класса В оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 53288-2009[6]. Методика, используемая при проведении эксперимента, описана в [16].

Для каждого образца огнетушащей суспензии проводилось не менее трех измерений.

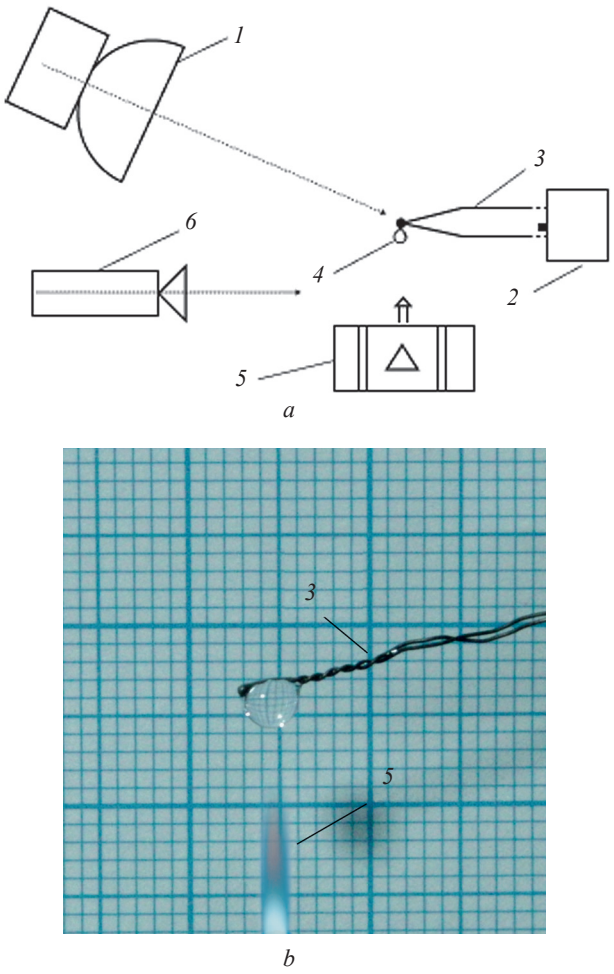


Рис. 1. Принципиальная схема *a* и фотография *b* установки для исследования скорости испарения капель огнетушащих суспензий: *1* — источник света; *2* — регистратор сигнала; *3* — термопара; *4* — капля жидкости; *5* — источник тепла; *6* — высокоскоростная камера

Fig. 1. The flow sheet *a* and the photograph *b* of an installation designated for the study of the rate of evaporation of droplets of fire-extinguishing suspensions: *1* — source of light; *2* — signal recorder; *3* — thermocouple; *4* — droplet of liquid; *5* — source of heat; *6* — high speed camera

Экспериментальная часть

Результаты измерений плотности огнетушащих суспензий

Диспергирование астраленов в концентрации 1,0 об. % в базовой жидкости для приготовления огнетушащей суспензии позволяет незначительно увеличить плотность жидкости — на 1,0 % при температуре 20 °С (рис. 3). Максимальный эффект наблюдается при нагреве исследуемой жидкости до температуры 50 °С, при которой плотность увеличивается на 1,82 %, (с 0,97 до 0,99 г/см^3).

Наибольшее увеличение плотности — с 0,9789 до 0,99837 г/см^3 — наблюдается у огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,2 об. % при температуре 50 °С (см. рис. 1). Увеличение показателя составляет 1,94 % по сравнению с базовой жидкостью.

Результаты измерений динамической вязкости огнетушащих суспензий

Полученные результаты показывают, что при диспергировании астраленов для приготовления огнетушащей суспензии динамическая вязкость при концентрациях 0,2 и 1,0 об. % повышается (рис. 4).

[6] ГОСТ Р 53288–2009. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Модульные установки пожаротушения тонкораспыленной водой автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 63-ст.

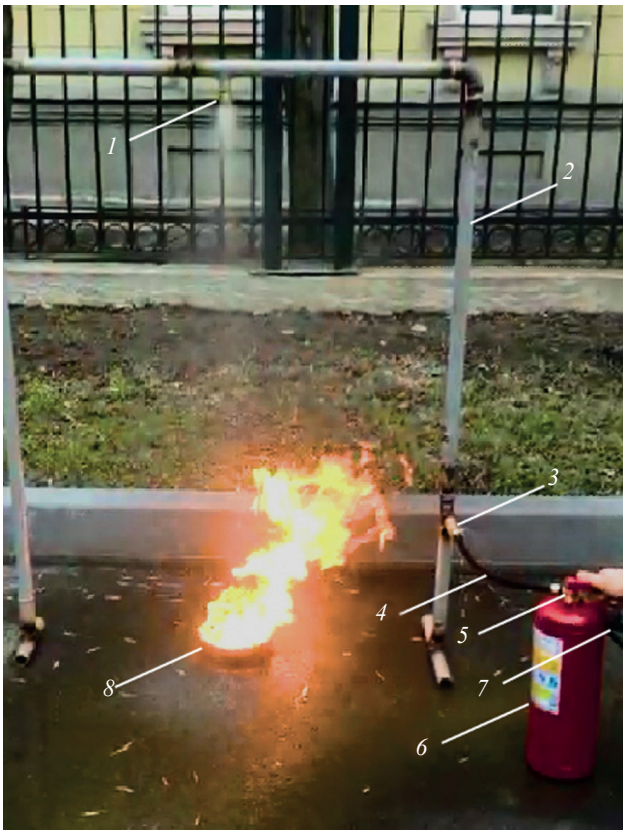


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по тушению пожара: *1* — ороситель, формирующий тонкораспыленную воду; *2* — трубопровод; *3* — соединительная арматура; *4* — шланг высокого давления; *5* — пусковая арматура; *6* — емкость с огнетушащим веществом под давлением 12 атм; *7* — арматура для закачки огнетушащей суспензии; *8* — емкость с горючей жидкостью

Fig. 2. The layout of an experimental fire extinguishing installation: *1* — sprinkler that produces finely sprayed water; *2* — pipeline; *3* — connecting fittings; *4* — high pressure hose; *5* — actuating fittings; *6* — container with a fire extinguishing agent under the pressure of 12 atm; *7* — fittings for injecting the fire extinguishing suspension; *8* — container with flammable liquid

Наибольшее увеличение при температуре 20 °С наблюдается у суспензии с концентрацией 1,0 об % — на 15,37 %, т.е. с 1038,8 до 1227,5 Па·с.

При увеличении концентрации астраленов не выявлено четко выраженной динамики в сторону повышения или снижения динамической вязкости огнетушащих суспензий с различной концентрацией наноструктур.

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения огнетушащих суспензий

Анализ полученных результатов показал, что присутствие астраленов в составе исследуемой огнетушащей суспензии при концентрациях до 0,1 об. % уменьшает поверхностное натяжение на 2,8 %, а при дальнейшем увеличении концентрации астраленов — увеличивает его соответственно на 10,9…20,6 % по сравнению с дистиллированной водой. Максимальное значение поверхностного натяжения достигнуто при диспергировании в огнетушащий состав 1,0 об. % астраленов и при температуре 20 °С составляет 0,091 Н/м (рис. 5).

Результаты измерений удельной теплоты парообразования огнетушащих суспензий

С ростом концентрации астраленов в составе огнетушащей суспензии удельная теплота парообразования увеличивается. Данный эффект наблюдается при концентрациях от 0,05 до 0,5 об. % (рис. 6). Увеличение удельной теплоты парообразования при данных концентрациях составило 25 % (с 1950 до 2600 Дж/кг).

Следует отметить, что при достижении концентрации астраленов 1,0 об. % удельная теплота парообразования значительно снижается —

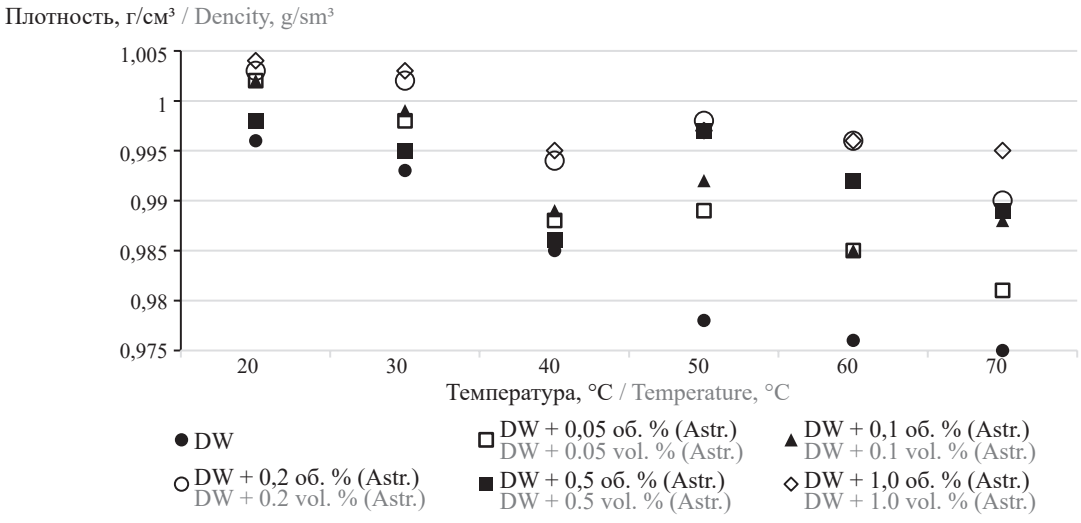


Рис. 3. Плотность огнетушащих суспензий DW с астраленами (Astr.)

Fig. 3. Density of fire extinguishing suspensions DW containing Astr

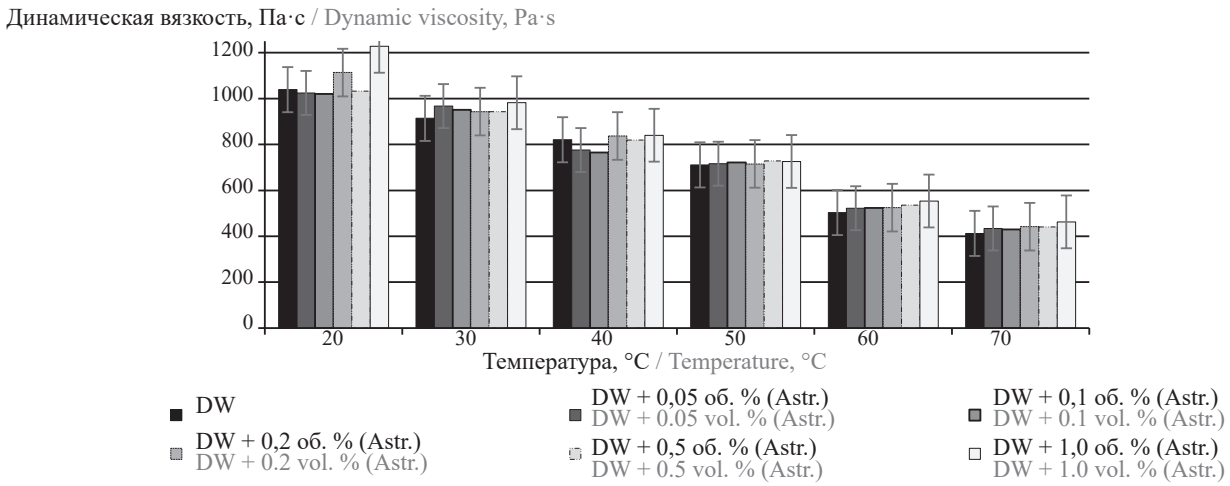


Рис 4. Динамическая вязкость огнетушащих суспензий DW с астраленами (Astr.)

Fig. 4. Dynamic viscosity of fire extinguishing suspensions DW with Astr.

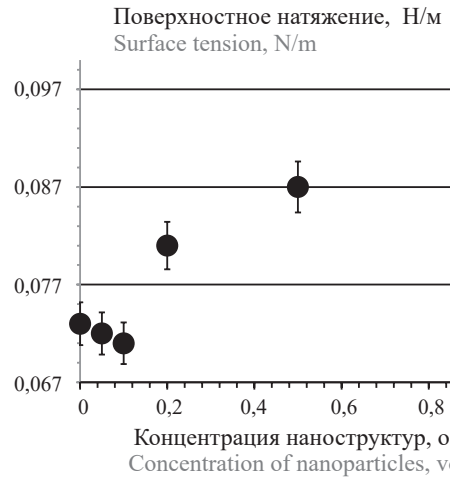


Рис. 5. Поверхностное натяжение огнетушащей суспензии в зависимости от концентрации наноструктур (от 0,05 до 1,0 об. %)

Fig. 5. The volumetric surface tension of the fire extinguishing suspension depending on the concentration of nanostructures (from 0.05 to 1.0 %)

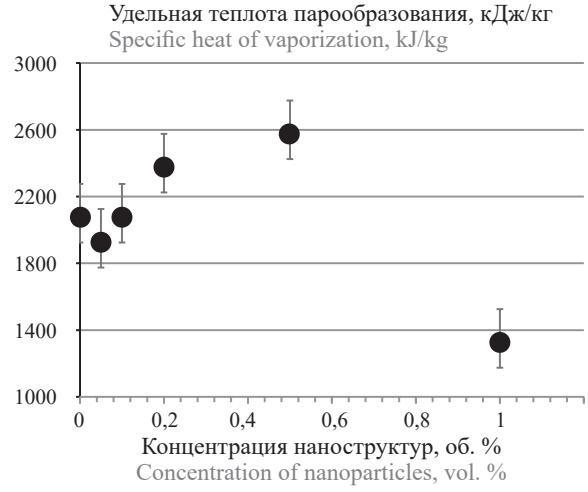


Рис. 6. Изменение удельной теплоты парообразования огнетушащей суспензии в зависимости от концентрации наноструктур (от 0,05 до 1,0 об. %)

Fig. 6. A change in the specific heat of vaporization of the fire extinguishing suspension depending on the volumetric concentration of nanostructures (from 0.05 to 1.0 %)

до 1350 Дж/кг, что ниже соответствующих значений для базовой жидкости на 750 Дж/кг (35,7 %).

Результаты измерений размера капель огнетушащих суспензий, формируемых на выходе из сплинклерного оросителя лабораторной модульной установкой пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ)

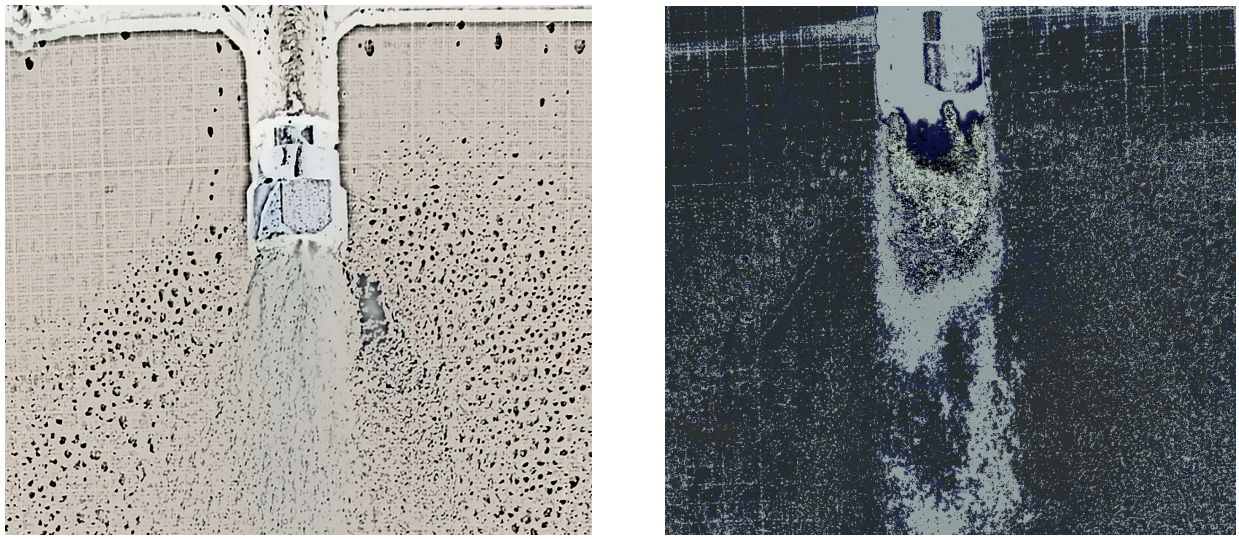
Анализ данных, полученных в ходе эксперимента, показал, что при помощи лабораторной установки возможно получение капель, размеры которых соответствуют параметрам тонкораспыленной воды. На рис. 7 представлены фото капельных потоков огнетушащей суспензии на выходе из оросителя лабораторной установки МУПТВ.

Частота распределения диаметров капель для каждого вида огнетушащего вещества представлена в виде гистограмм на рис. 8.

Анализ распределения размеров капель показал, что наибольшее количество распыленных капель огнетушащих суспензий имеет размер от 60 до 100 мкм для всех образцов исследуемых ОТВ. Также можно отметить, что с увеличением количества астраленов в базовой жидкости наблюдается незначительное увеличение количества распыленных капель больших размеров.

Результаты измерений скорости движения капель тонкораспыленных огнетушащих суспензий

Анализ полученных данных показал, что скорость движения водяных потоков находится



a *b*

Рис. 7. Фото капельных потоков огнетушащих суспензий: *a* — дистиллированная вода; *b* — ОТВ с наноструктурами в концентрации 1,0 об. %

Fig. 7. A photo of droplet flows of fire extinguishing suspensions: *a* — distilled water; *b* — fire extinguishing suspensions with nanostructures 1.0 vol. %

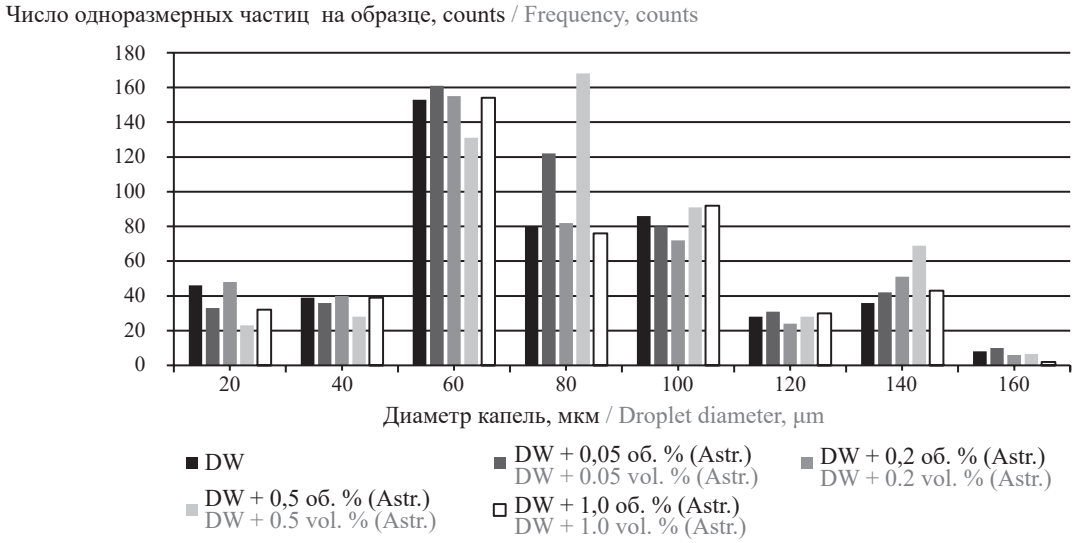


Рис. 8. Гистограмма плотности распределения диаметров капель огнетушащих суспензий DW с астраленами

Fig. 8. A histogram of the density distribution of droplet diameters of fire extinguishing suspensions DW with Astr.

в диапазоне, соответствующем движению жидкости при давлении 1,2 мПа, и составляет 39,17…39,97 м/с (рис. 9). Скорость движения капельных потоков огнетушащих суспензий практически не зависит от концентраций астраленов.

Капли огнетушащих суспензий с концентрацией астраленов 0,05 об. % имеют среднюю скорость 39,23 м/с. При повышении концентрации до 0,25 об. % средняя скорость повышается на 0,2 % — до 39,28 м/с. Наибольшая средняя скорость движения жидкости определена у немодифицированного огнетушащего состава и составляет 39,97 м/с.

Результаты измерений скорости испарения капель огнетушащих суспензий

Размер исследуемых капель огнетушащих суспензий преимущественно варьируется в интервалах от 1,15 до 1,26 мм. По результатам эксперимента установлено, что с увеличением концентрации астраленов время испарения капель исследуемой огнетушащей суспензии уменьшается (рис. 10).

Наибольшее время испарения капель жидкости наблюдается при диспергировании в огнетушащий состав 0,5 об. % астраленов и составляет 15,4 с. Наибольшее снижение времени испарения выявлено у капель с концентрацией астраленов 1,0 об. %

(6,9 с), что на 24,5 % меньше, чем у базовой жидкости.

Для определения скорости испарения капель огнетушащей суспензии необходимо вычислить массу капли. Зная радиус и принимая шар в качестве геометрической формы, рассчитали объем исследуемых капель, который составлял от 6,37 до 8,37 мм^3. Учитывая значения плотности огнетушащих суспензий, определяли скорость испарения капель (рис. 11).

Для огнетушащих суспензий с концентрациями астраленов от 0 до 0,5 об. % наблюдается уменьшение скорости испарения капель от 0,89 до 0,49 мг/с. При достижении концентрации наноструктур 1,0 об. % скорость испарения капель резко возрастает до 1,19 мг/с. Данное значение превышает скорость испарения базовой жидкости на 25 %.

Результаты измерений времени тушения модельного очага пожара тонкораспыленными огнетушащими суспензиями

Применение огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,05 об. %, в том числе дистиллированной воды в МУПТВ не привели к тушению модельного очага пожара (рис. 12, *a*).

При помощи огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,25 об. % модельный очаг пожара был потушен в среднем за 3 с (рис. 12, *b*). Выявлена наиболее эффективная концентрация астраленов, которая составила 0,5 об. %. Среднее время тушения модельного очага пожара данной суспензией — 2 с (рис. 12, *c*). Среднее время тушения модельного очага пожара огнетушащей суспензией с наибольшей из предложенных концентрацией астраленов (1,0 об. %) составляет 6 с (рис. 12, *d*).

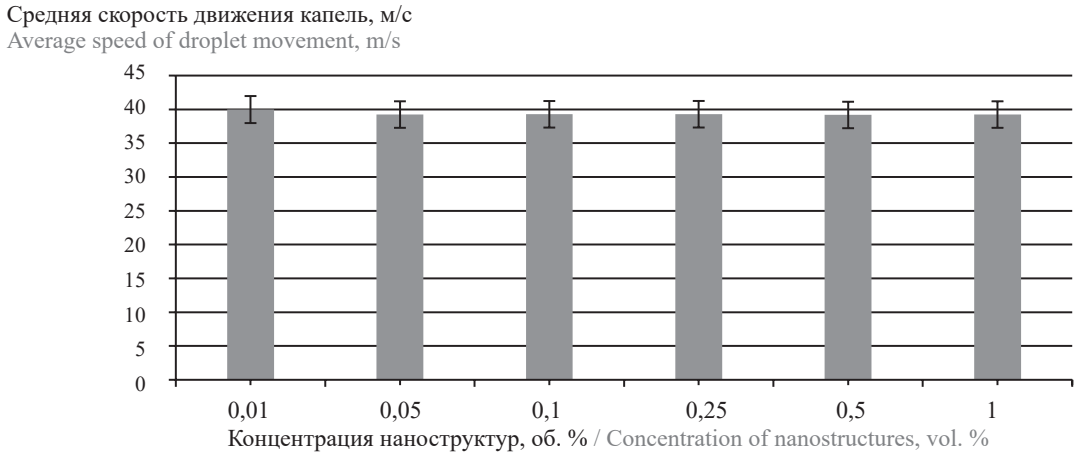


Рис. 9. Скорость движения водяных потоков огнетушащих суспензий DW + Astr.

Fig. 9. The velocity of water flows of extinguishing suspensions DW + Astr.

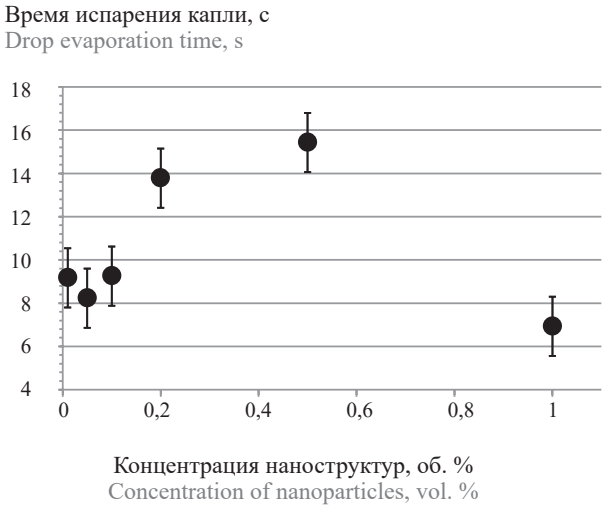


Рис. 10. Время испарения капель модифицированной огнетушащей жидкости DW + Astr.

Fig. 10. The evaporation time of droplets of modified extinguishing fluid DW + Astr.

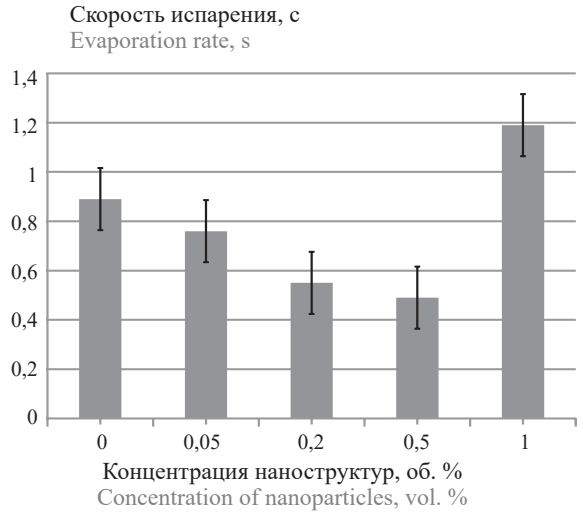
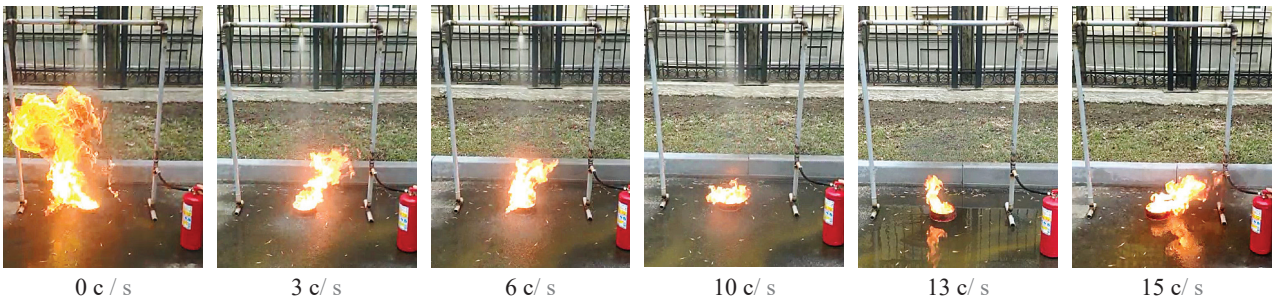
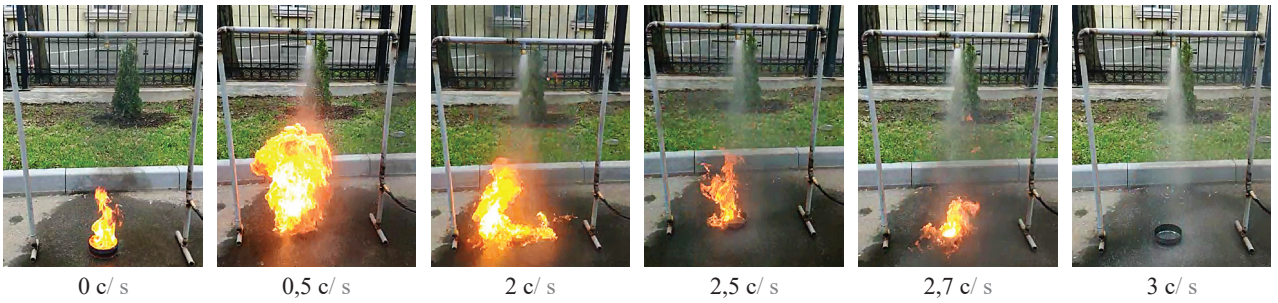


Рис. 11. Скорость испарения капель огнетушащих суспензий DW + Astr.

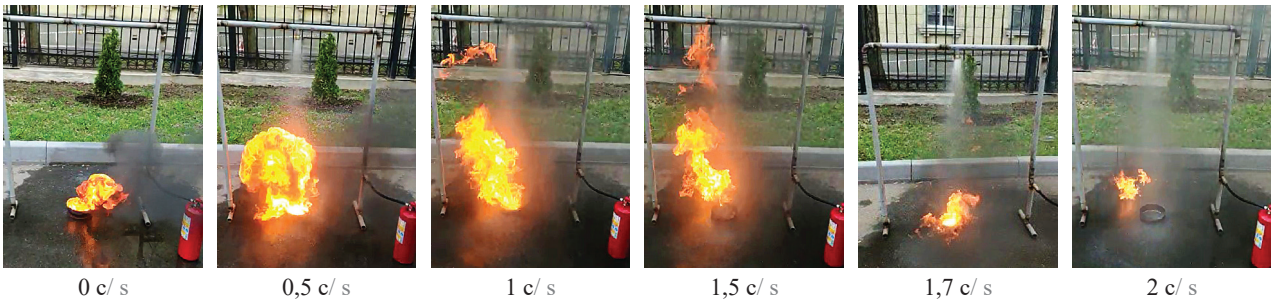
Fig. 11. The evaporation rate of droplets of extinguishing suspensions DW + Astr.



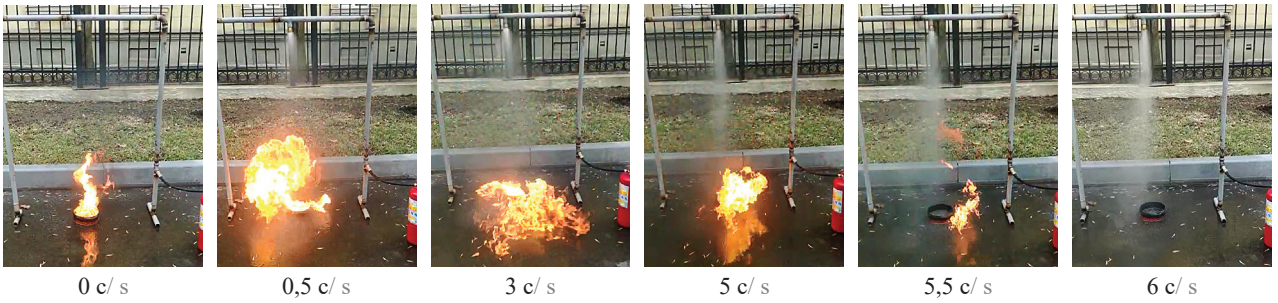
a



b



c



d

Рис. 12. Фото тушения горючей жидкости дистиллированной водой (*a*), огнетушащей суспензией с концентрацией астраленов 0,25 об. % (*b*), 0,5 об. % (*c*) и 1,0 об. % (*d*)

Fig. 12. Photos of the process of extinguishing combustible liquid using (*a*) distilled water, (*b*) fire extinguishing suspension 0.25 vol. % Astr; (*c*) 0.5 vol. % Astr; (*d*) 1.0 vol. % Astr.

Анализ данных показал, что наиболее эффективным огнетушащим веществом является суспензия с концентрацией астраленов 0,5 об. %. Среднее время тушения при данной концентрации составляет 2 с. С увеличением концентрации повышается время тушения (рис. 13). Так, при диспергировании астраленов в состав ОТВ 1,0 об. % ликвидация очага горения происходит за 6 с.

Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты показали, что огнетушащая способность МУПТВ зависит от ряда факторов, которые определяются физико-химическими свойствами огнетушащих суспензий и их эксплуатационными характеристиками.

Диспергирование астраленов в состав дистиллированной воды с концентрациями до 1,0 об. % не при-

Рис. 13. Зависимость времени тушения модельного очага пожара от концентрации астраленов в огнетушащей суспензии DW + Astr.

Fig. 13. Dependence of the model fire bed extinguishment time on concentration of astralenes in the fire extinguishing suspension DW + Astr.

водит к значительным изменениям динамической вязкости и плотности. Данные результаты согласуются с работой [17], в которой максимальное увеличение динамической вязкости (с 0,0011 до 0,00128 Па·с) наблюдается у наножидкости с температурой 22 °С и концентрацией наноструктур 1,0 об. % и составляет 14,06 % по отношению к базовой жидкости. В работе [18] приводятся экспериментальные данные по изменению плотности наножидкости на водной основе. При диспергировании углеродных нанотрубок с концентрацией 1,05 об. % наблюдается изменение плотность не более чем на 1 % относительно базовой жидкости. Результаты работ согласуются с данными текущего исследования.

Изменение поверхностного натяжения огнетушащих суспензий соответствует данным, приведенным в работе [19]. Поверхностное натяжение наножидкости увеличивается с повышением концентрации наночастиц. Стоит отметить, что при диспергировании астраленов в состав воды наблюдается резкое снижение поверхностного натяжения относительно базовой жидкости. Дальнейшее повышение концентрации наноструктур приводит к ярко выраженному увеличению поверхностного натяжения.

Увеличение показателя удельной теплоты парообразования исследуемых огнетушащих суспензий согласуется с данными, полученными в работе [20]. Диспергирование углеродных наноструктур в состав дистиллированной воды приводит к повышению удельной теплоты парообразования с 2100 до 2300…2400 кДж/кг при концентрации наночастиц 1,0 об. %.

Указанные выше характеристики определяют условия подачи огнетушащих суспензий с помощью МУПТВ и динамику образования капель огнетушащих суспензий и скорости их испарения в конвективном тепловом потоке. Несмотря на то, что диаметр капель увеличивается, скорость их испарения сокращается на 44,9 % при концентрации астраленов 0,5 об. %.

Теоретическое время тушения горючей жидкости с помощью МУПТВ определялось с помощью выражения (3):

$$t = -\frac{4}{3}\frac{\lambda\cdot\rho}{c\cdot m^2}\left[\frac{I_{кр}}{I} + ln\left(1-\frac{I_{кр}}{I}\right)\right], \qquad (3)$$

где m — массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м^2·с$^{-1}$);

c, ρ, λ — теплоемкость, плотность, теплопроводность горючей жидкости, соответственно;

I — интенсивность орошения водой поверхности горючей жидкости, л/м^2·с;

$I_{кр}$ — критическая интенсивность тушения горючей жидкости, л/м^2·с [2].

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных времени тушения модельного очага пожара использовались формулы (2) и (3). Исходные данные теплофизических характеристик горючей жидкости и огнетушащих составов принимались в соответствии с работой [21].

В ходе расчетов установлено, что теоретическое время тушения в целом соответствует экспериментальным данным (рис. 14).

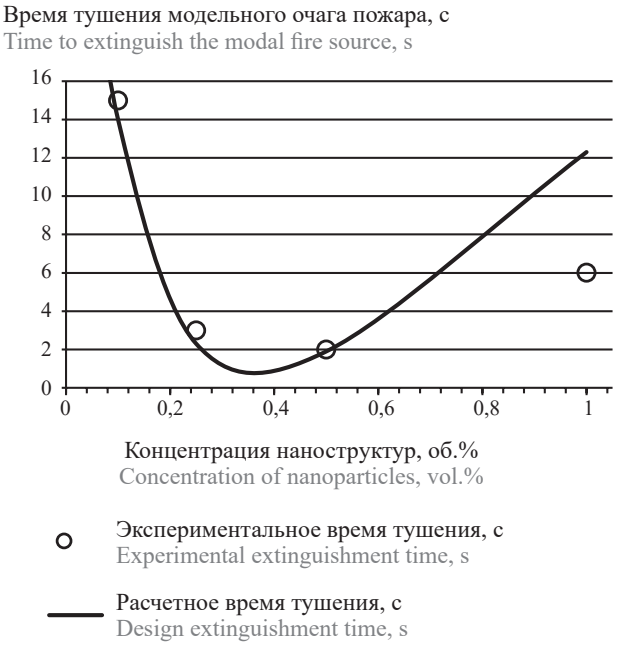


Рис. 14. Зависимость от концентрации астраленов времени тушения пламени горючей жидкости огнетушащими суспензиями

Fig. 14. Dependence between the extinguishment time of the combustible liquid flame and the concentration of astralenes, if fire-extinguishing suspensions are applied

Выводы

Наибольшую огнетушащую способность показала МУПТВ при использовании огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,5 об. %.

Модифицирование огнетушащих суспензий астраленами приводит к повышению их удельной теплоты парообразования на 25 % (с 1950 до 2600 Дж/кг при концентрации 0,5 об. %) и поверхностного натяжения на 20 % (с 0,073 до 0,091 Н/м при концентрации 1,0 об. %) при относительно малом изменении динамической вязкости и плотности. Это позволяет избежать затрат, связанных с изменением конструкции МУПТВ.

Экспериментальные данные в целом согласуются с математической моделью, описывающей время тушения, что говорит о наибольшем вкладе удельной теплоты парообразования в наблюдаемом повышении огнетушащей способности установок с исследуемыми огнетушащими суспензиями. Параметры МУПТВ, несомненно, будут влиять на теоретическое время тушения очага пожара, поэтому в последующем предполагается провести исследования расширенной номенклатуры МУПТВ с разработанными огнетушащими суспензиями.

Кроме того, необходимо учитывать, что данные огнетушащие суспензии не являются стабильными в течение длительного времени без применения сурфакантов [22]. Поэтому в дальнейшем необходимо разрабатывать в том числе гибридные методы дезагломерации астраленов с целью поиска наиболее оптимальных способов и режимов получения стабильных дисперсий. Также суспензии имеют относительно высокую температуру замерзания. Это способствует исследованиям в области разработки наносоставов для применения в условиях низких температур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Хасанов И.Р., Думилин А.И.* Тушение горючих жидкостей распыленной водой // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Балашиха, 2016. С. 363–366. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900
2. *Думилин А.И.* Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 4. С. 85–90. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19436559
3. *Mawhinney J.R., Back G.G.* Water mist fire suppression systems // SFPE Handbook of fire protection engineering. New York, NY : Springer, 2016. Pp. 1587–1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46
4. *Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S.V.* Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 93. Pp. 441–455. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015
5. *Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H.* Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 12. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973
6. *Feng M., Tao J., Qin J. Fei Q.* Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additives // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34. No. 1. Pp. 51–68. DOI: 10.1177/0734904115618220
7. *Wu B., Liao G.* Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive // Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. Pp. 317–323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
8. *Halelfadl S., Maré T., Estellé P.* Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants // Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. Vol. 53. Pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.010
9. *Hung Y.H., Gu H.J.* Multiwalled carbon nanotube nanofluids used for heat dissipation in hybrid green energy systems // Journal of Nanomaterials. 2014. Vol. 2014. P. 12. DOI: 10.1155/2014/196074
10. *Иванов А.В., Торопов Д.П., Ивахнюк Г.К., Федоров А.В., Кузьмин А.А.* Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ognetushaschih-svoystv-vody-i-gidrogeley-s-uglerodnymi-nanostrukturami-pri-likvidatsii-goreniya-nefteproduktov

11. *Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В.* Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 173–188. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15606580
12. *Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J. et al.* Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // Diamond and Related Materials. 2009. Vol. 8. No. 2, 3. Pp. 505–510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056
13. *Ponomarev A., Iudovich M.* Multi-layered carbon nanoparticles of the fulleroid type. United States patent US No. 9.090.752. 2015 Jul. 28.
14. *Suriyawong A., Wongwises S.* Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO2-water nanofluids at very low concentrations // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. Vol. 34. No. 8. Pp. 992–999. DOI: 10.1016j.expthermflusci.2010.03.002
15. *Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д.* Динамика отрыва одиночных капель в воздушной среде // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. 2014. № 4. С. 109–118. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21811487
16. *Zhu P., Wang X., Wang. Z., Cong H., Ni X.* Experimental study on transformer oil pool fire suppression by water mist // Fire Science and Technology. 2017. Pp. 895–901. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_92
17. *Sekhar Y.R., Sharma K.V.* Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids at low particle concentrations // Journal of experimental Nanoscience. 2015. Vol. 10. No. 2. Pp. 86–102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595
18. *Shoghl S.N., Jamali J., Moraveji M.K.* Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. Vol. 74. Pp. 339–346. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.004
19. *Tanvir S., Qiao L.* Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // Nanoscale Research Letters. 2012. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226
20. *Иванов А.В., Торопов Д.В., Медведева Л.В., Калинина Е.С.* Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34
21. *Wang C., Xu H., Herreros J.M., Lattimore T., Shuai S.* Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine // Energy & Fuels. 2014. Vol. 28. No. 3. Pp. 2003–2012. DOI: 10.1021/ef402234z
22. *Soma K., Babu J.S.C.* Factors influencing the rheological behavior of carbon nanotube water-based nanofluid // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2015. Vol. 23. No. 8. Pp. 750–754. DOI: 10.1080/1536383X.2014.973489

REFERENCES

1. Khasanov I.R., Dumilin A.I. Extinguishing flammable liquids with sprayed water. *Actual problems of fire safety : Materials of the XXVIII international scientific and practical conference: in 2 parts*. International Salon of Security Means: “Integrated Security”. 2016; 363-366. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900 (rus).
2. Dumilin A.I. Factors of extinguishing of the flame of combustible liquids by sprayed water. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(4):85-90. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19436559 (rus).
3. Mawhinney J.R., Back G.G. Water mist fire suppression systems. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. New York, NY, Springer, 2016; 1587-1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46
4. Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S.V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 93:441-455. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015
5. Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H. Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:12. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973

6. Feng M., Tao J., Qin J. Fei Q. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additives. *Journal of Fire Sciences*. 2016; 34(1):51-68. DOI: 10.1177/0734904115618220
7. Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive. *Procedia Engineering*. 2013; 62:317-323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
8. Halelfadl S., Maré T., Estellé P. Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014; 53:104-110. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.010
9. Hung Y.H., Gu H.J. Multiwalled carbon nanotube nanofluids used for heat dissipation in hybrid green energy systems. *Journal of Nanomaterials*. 2014; 2014:12. DOI: 10.1155/2014/196074
10. Ivanov A.V., Toropov D.P., Ivakhnyuk G.K., Fedorov A.V., Kuzmin A.A. Investigation of the fire-extinguishing properties of water and hydrogels with carbon nanostructures in the elimination of combustion of petroleum products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):31-44. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ognetushaschih-svoystv-vody-i-gidrogeley-s-uglerodnymi-nanostrukturami-pri-likvidatsii-goreniya-nefteproduktov (rus).
11. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Lemanov V.V. The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer. *Thermal physics and aeromechanics*. 2010; 17(2):173-188. DOI: 10.1134/S0869864310020010 (rus).
12. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J. et al. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles. *Diamond and Related Materials*. 2009; 8(2-3):505-510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056
13. Ponomarev A., Iudovich M. *Multi-layered carbon nanoparticles of the fulleroid type*. United States patent US No. 9.090.752. 2015 Jul. 28.
14. Suriyawong A., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO2-water nanofluids at very low concentrations. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010; 34(8):992-999. DOI: 10.1016j.expthermflusci.2010.03.002
15. Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D. Dynamics of separation of a single drop in air. *Fluid Dynamics*. 2014; 4:109-118. DOI: 10.1134/S0015462814040115 (rus).
16. Zhu P., Wang X., Wang. Z., Cong H., Ni X. Experimental study on transformer oil pool fire suppression by water mist. *Fire Science and Technology*. 2017; 895-901. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_92
17. Sekhar Y.R., Sharma K.V. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids at low particle concentrations. *Journal of experimental Nanoscience*. 2015; 10(2):86-102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595
18. Shoghl S.N., Jamali J., Moraveji M.K. Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 74:339-346. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.004
19. Tanvir S., Qiao L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials. *Nanoscale Research Letters*. 2012; 7(1):1-10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226
20. Ivanov A.V., Toropov D.V., Medvedeva L.V., Kalinina E.S. Physical mechanism and method for quenching liquid hydrocarbons by modified suspensions of water with carbon nanostructures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):22-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34 (rus).
21. Wang C., Xu H., Herreros J.M., Lattimore T., Shuai S. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine. *Energy & fuels*. 2014; 28(3):2003-2012. DOI: 10.1021/ef402234z
22. Soma K., Babu J.S. Factors influencing the rheological behavior of carbon nanotube water-based nanofluid. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2015; 23(8):750-754. DOI: 10.1080/1536383X.2014.973489

Поступила 09.06.2021, после доработки 20.07.2021;
принята к публикации 26.07.2021
Received June 9, 2021; Received in revised form July 20, 2021;
Accepted July 26, 2021

Информация об авторе

ПУСТОВАЛОВ Илья Андреевич, адъюнкт кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; РИНЦ ID: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

Information about the author

Ilya A. PUSTOVALOV, adjunct of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 98–102
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFET. 2021; 30(5):98-102
УДК 614.849/ 311.3

Сухая трава и мусор в обновленной пожарной статистике

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены документы по мировой статистике пожаров. Проведен анализ влияния пожаров мусора и сухой травы на общее распределение пожаров в России. Представлены примеры распределения пожаров по их видам и причинам. Показаны количественные и качественные изменения в обновленной пожарной статистике. Дано обобщение информации с указанием особенностей трактовки выходных данных.

Ключевые слова: статистика пожаров; гибель людей; материальный ущерб; пожарная безопасность; электрооборудование

Для цитирования: *Харламенков А.С.* Сухая трава и мусор в обновленной пожарной статистике // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 98–102.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Dry grass and rubbish in the updated fire statistics

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

The article addresses documents on the world fire statistics. The co-authors analyze the influence of garbage and dry grass fires on the total breakdown of fires in Russia. Cases of the fire breakdown by the type and cause are presented. Quantitative and qualitative changes in the updated fire statistics are demonstrated. The information is generalized with a focus on features of interpretation of the output data.

Keywords: fire statistics; fatality; material damage; fire safety; electrical equipment

For citation: Kharlamenkov A.S. Dry grass and rubbish in the updated fire statistics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):98-102 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС:

Начиная с 2019 г. в Российской Федерации изменился порядок учета пожаров, который стал включать в себя загорания, связанные с горением сухой травы (сено, камыш и т.д.) и мусора[1]. Со времен СССР эти пожары не включались в статистику. При этом подразделения пожарной охраны регулярно выезжали на ликвидацию горения, затрачивая при этом значительные материальные и человеческие ресурсы [1].

Учет пожаров мусора и сухой травы — обыденная практика большинства стран Европы, Северной и Южной Америки, где по состоянию на 2019 г. пожары травы и мусора составляют в среднем 34 % от общего их числа [2]. В 2019 г. наибольший процент пришелся на Украину, Хорватию, Эстонию и Россию. В крупных странах Евросоюза данный показатель находится в пределах 15...30 %, а в США составляет 32,6 % (рис. 1).

За 2020 г. на территории РФ прямой материальный ущерб от указанных выше загораний составил около 25 млн руб., что соответствует 1 % от общего ущерба по всем видам объектов пожаров, а их количество составило 247 тыс. [3] (55 % всех пожаров). Это значение достаточно высокое по сравнению с показателями других стран мира, что указывает на необходимость поиска и применения эффективных способов снижения опасности.

Одним из них можно считать постановление Правительства РФ №1479, утвердившее новые Правила

[1] Об утверждении Порядка учета пожаров и их последствий (с изм. 17 ноября 2020) : приказ МЧС России от 21 ноября 2008 г. № 714.

© А.С. Харламенков, 2021

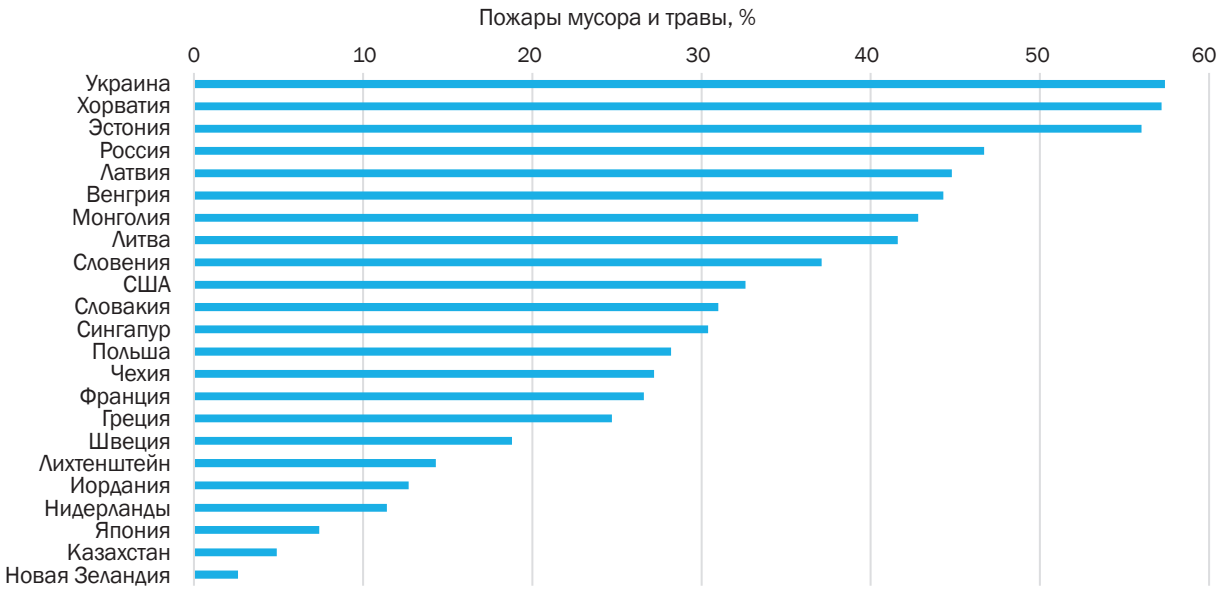


Рис. 1. Пожары сухой травы и мусора в различных странах мира за 2019 г. [2] (проценты от общего числа пожаров)

противопожарного режима (далее — ППР) [2]. В пп. 66 и 185 ППР появилось требование по запрету разведения костров, сжигания травы и мусора на территориях частных домовладений, землях запаса, сельскохозяйственного назначения и землях общего пользования населенных пунктов. Кроме этого, для исключения перехода пожара с полей на лесные массивы внесено требование (п. 186 ППР), согласно которому владельцам земельных участков сельскохозяйственного назначения следует принимать меры по исключению зарастания угодий сорной растительностью.

Наибольший резонанс вызвал запрет на разведение костров на частных территориях, в первую очередь на дачных участках. В результате этого, в июле 2021 г. был подготовлен проект о внесении изменений в ППР [4], где из п. 66 предлагается убрать фразу «разводить костры». В конечном варианте пункт будет выглядеть следующим образом: «На землях общего пользования населенных пунктов, а также на территориях частных домовладений, расположенных на территориях населенных пунктов, запрещается использовать открытый огонь для приготовления пищи вне специально отведенных и оборудованных для этого мест, а также сжигать мусор, траву, листву и иные отходы, материалы или изделия». Даже в таком виде требования ППР не значительно смягчат требования пожарной безопасности к палу сухой травы и мусора.

Также в 2020 г. был принят документ, разграничивающий полномочия по тушению ландшафтных (природных) пожаров[3]. Они включают в себя пожары в полях и лесах. По этому закону борьба с ландшафтными пожарами должна осуществляться силами региональных подразделений пожарной охраны, а на землях лесного фонда эту задачу будут решать лесопожарные формирования субъектов РФ.

В 2020 г. вступило в силу постановление Правительства РФ, устанавливающее новый порядок определения признаков неиспользования сельскохозяйственных участков по целевому назначению[4], к которым относятся различные виды загрязнения и захламления земель, наличие самовольных построек и сорных растений на определенной площади.

С учетом успешной реализации вышеуказанных норм на практике можно ожидать заметного снижения числа рассматриваемых пожаров в России с достижением средних значений величин в мировой пожарной статистике.

С добавлением такого значительного количества видов пожаров в общий список может появиться обманчивое впечатление, что пожарной охране следует направить пристальное внимание именно на горящий мусор и траву. Поэтому имеет смысл рассмотреть резонный вопрос. Какие количественные и качественные изменения внес новый «формат» статистики пожаров в последующий анализ состояния пожарной безопасности нашей страны?

ОТВЕТ

Для начала сопоставим общую статистику пожаров по причинам их возникновения за 2018 (до появления отдельных строк «мусор» и «сухая трава») и 2020 годы. Из представленной гистограммы (рис. 2) видно, что среди наиболее частых причин пожаров наибольший рост при-

[2] Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 21 мая 2021) : постановление Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. № 1479.

[3] О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования деятельности в области пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22 декабря 2020 г. № 454-ФЗ; принят Государственной Думой 9 декабря 2020 г.; одобрен Советом Федерации 16 декабря 2020 г.

[4] О признаках неиспользования земельных участков из земель сельскохозяйственного назначения по целевому назначению или использования с нарушением законодательства Российской Федерации : Постановление правительства от 18 сентября 2020 г. № 1482 ; утверждено Председателем Правительства РФ 22 сентября 2020 г.

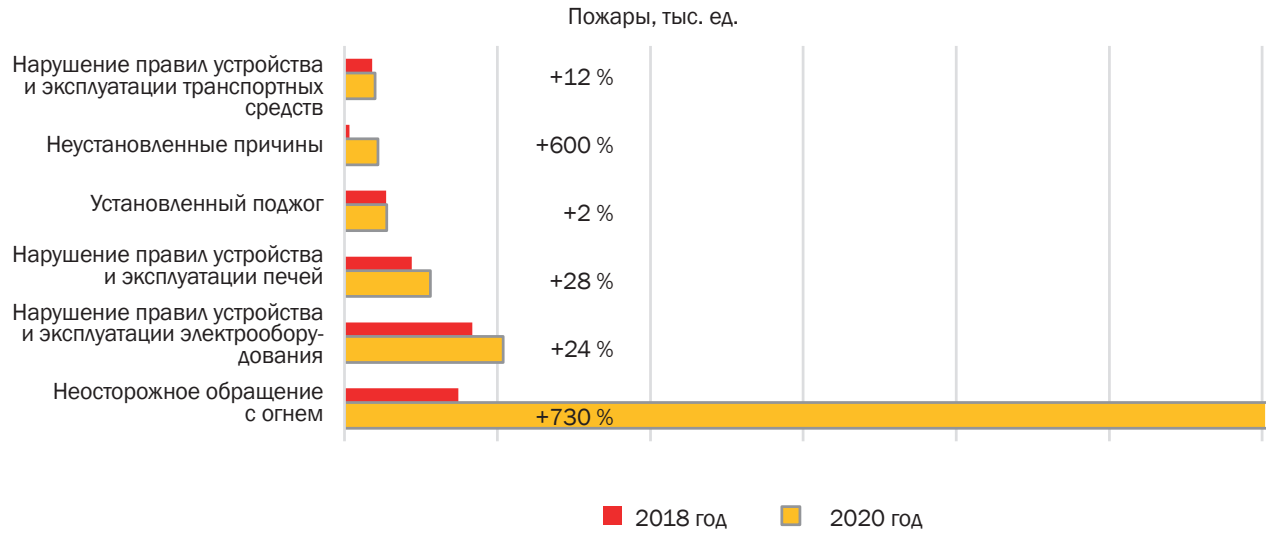


Рис. 2. Гистограмма распределения пожаров по наиболее частым причинам их возникновения за 2018 и 2020 годы

шелся на «неустановленные причины» и «неосторожное обращение с огнем» [3]. Отмеченные показатели выросли более чем в 7 раз по сравнению с 2018 г.

Этот факт указывает на то, что пожары мусора и сухой травы происходили в основном из-за неосторожного обращения с огнем, а для части возгораний так и не удалось определить причину. Это указывает на халатность и наличие ощущения безнаказанности у людей-поджигателей, низкий контроль со стороны надзорных органов, отсутствие действенных превентивных мер по снижению конечных потерь и ущерба в случае пожара.

Сравнивая более наглядные диаграммы процентного распределения причин пожаров (рис. 3) за 2018 и 2020 годы, можно установить, что в 2020 г. больше 70 % приходится именно на пожары, связанные с неосторожным обращением с огнем, т.е. при сжигании мусора и сухой травы.

Представленное на рис. 3 распределение причин пожаров за 2020 г. дает ложную количественную оценку степени значимости каждой из причин. Так как в 2018 г. первое место в качестве главной причины занимало «нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования», ущерб от которого составлял на 2018 г. около 6 млрд руб., а в 2020 г. — 13 млрд руб. Для сравнения, по причине «неосторожное обращение с огнем» ущерб на 2018 г. составил 1,3 млрд руб., а в 2020 г. — 1,5 млрд руб. [3]. В результате «обновленного» распределения статистических данных о пожарах «неосторожное обращение с огнем» искусственно занижает остальные, не менее важные причины. Поэтому необходимо учитывать «новые» особенности формирования статистики при анализе конечных показателей.

В качестве примера, гистограмма на рис. 4 показывает, что число пожаров из-за электроустановок ежегодно продолжает расти, а вместе с ними и прямой материальный ущерб.

При этом по значениям диаграммы на рис. 3 за 2020 г. можно сделать ошибочный вывод о состоянии пожарной

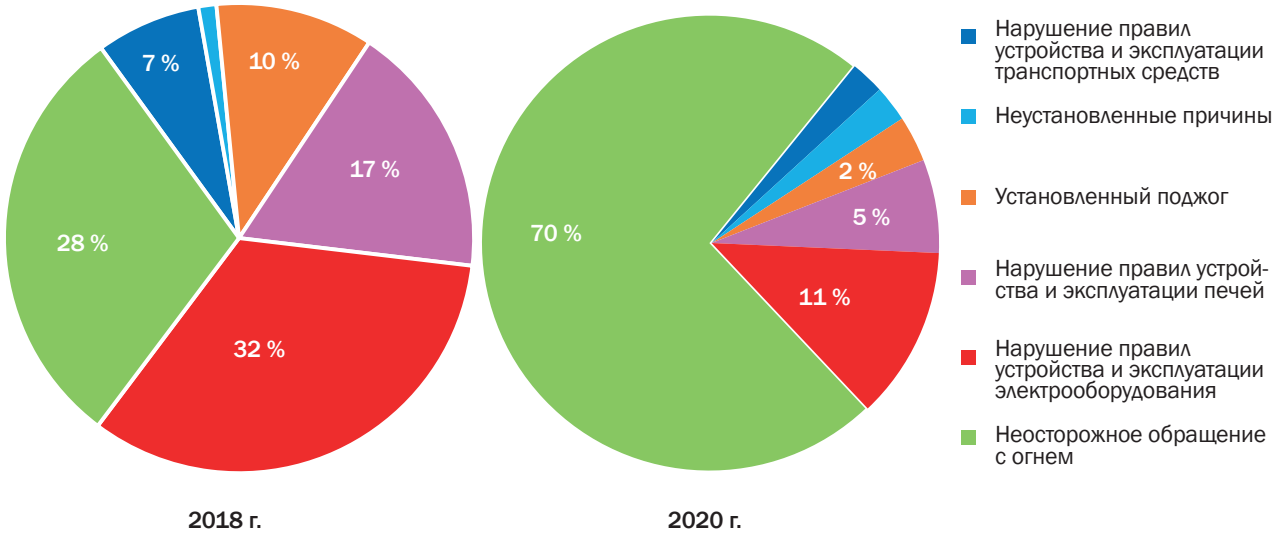


Рис. 3. Диаграммы распределения пожаров по наиболее частым причинам их возникновения за 2018 и 2020 годы [3]

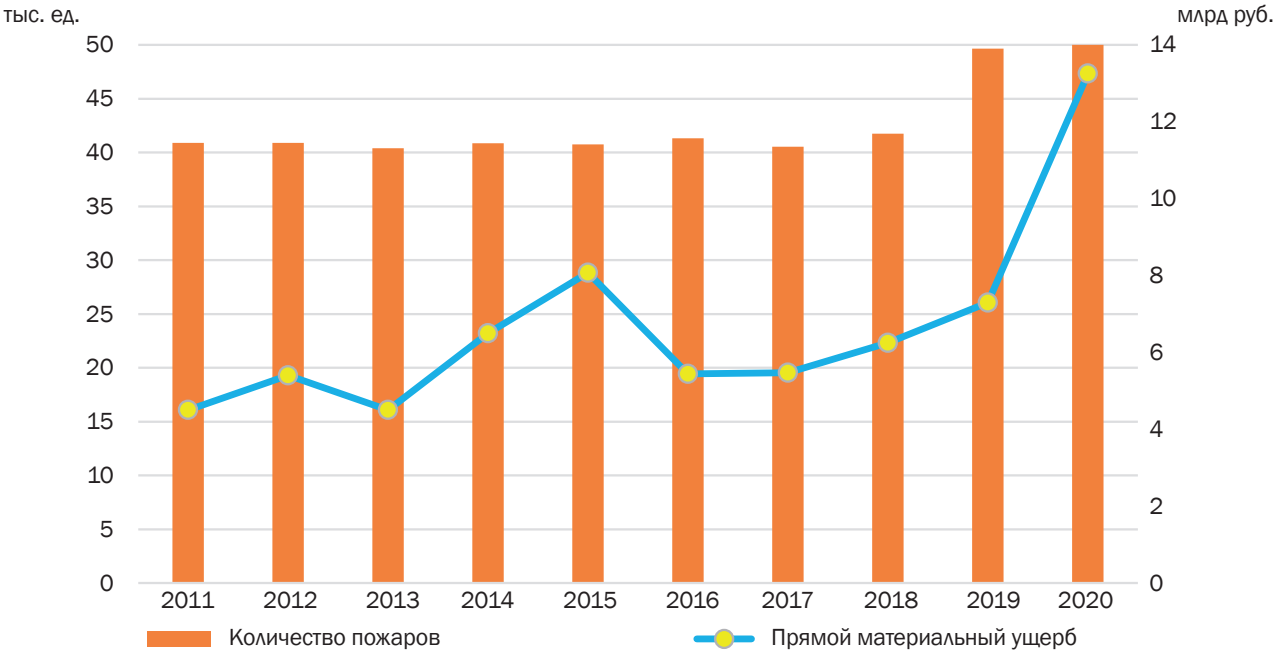


Рис. 4. Гистограмма распределения числа пожаров по причине нарушения устройства и эксплуатации электрооборудования за последние 10 лет [3, 5]

безопасности с опорой на процентное распределение пожаров по их причинам.

Следует отметить, что по статистике из-за неосторожного обращения с огнем погибает наибольшее число людей, в среднем 4,5 тыс. человек в год. В результате нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования смертность составляет в среднем около 2 тыс. человек в год.

В целом, добавление в статистику пожаров от мусора и сухой травы значительно не повлияло на количество летальных исходов и величину прямого материального ущерба по существующим причинам (рис. 5) [3]. Поэтому введение в статистику «новых» видов пожаров не изменило общую картину смертности и материальных потерь на территории РФ.

Изменения, внесенные в Порядок учета пожаров, привели к значительному росту их числа (в 3,5 раза). За 2019–2020 годы сухая трава и мусор стали объектами большей половины всех пожаров в России. Принимаемые меры как на законодательном, так и на исполнительном уровнях уже дали заметные результаты. Количество данных пожаров в период с 2019 по 2020 годы снизилось на 10 % [3].

Количественные изменения произошли и в распределении числа пожаров по их видам и причинам возникновения. Вследствие этого на фоне резкого увеличения

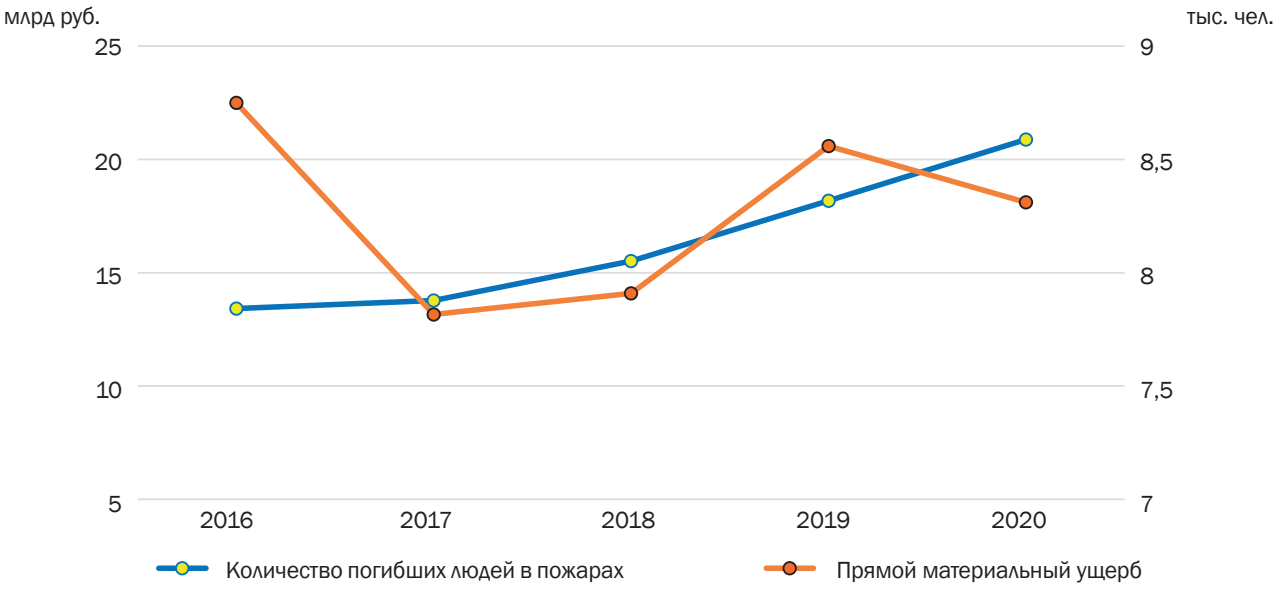


Рис. 5. Графики распределения числа погибших и прямого материального ущерба от пожаров за 2016–2020 годы [3]

пожаров из-за неосторожного обращения с огнем заметно снизились статистические показатели (в процентах) по иным причинам. Отмеченное обстоятельство следует в дальнейшем учитывать при анализе опасных случаев, приводящих к наибольшему материальному ущербу и гибели людей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В.* О статистике пожаров и о пожарных рисках // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 4. С. 40–48. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902998

2. *Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P.* World Fire Statistics: Report No. 26. CFS of CTIF. Moscow-Berlin. 2021. 66 p. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report21_english-polish-german_0.pdf

3. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО. 2021. 112 с.

4. Проект постановления Правительства Российской Федерации «О внесении изменений в Правила противопожарного режима в Российской Федерации» // Федеральный портал проектов нормативных правовых актов. URL: https://regulation.gov.ru/projects#npa=117929

5. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: Статистический сборник / под общ. ред. А.В. Матюшина. М. : ВНИИПО. 2016. 124 с.

Материал поступил в редакцию 30.09.2021

Received September 30, 2021

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

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

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Использованные в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;
- для рисунка: подрисуночной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристатейные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % об общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс http://www. dissercat.com.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристатейные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!