

5-2020

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ
ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

№5 ТОМ 29
2020

Издательство
**ПОЖАРОВЗРЫВО-
БЕЗОПАСНОСТЬ**
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



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

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
Эл № ФС77-79403 от 16 октября 2020 г.

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Махиянова Е.Б.**
Корректор **Светличная Л.В.**
Дизайнер **Федотов А.Д.**

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 Российского
индекса научного цитирования (РИНЦ),
в Справочно-библиографическую службу
EBSCO. Сведения о журнале ежегодно
публикуются в Международной справочной
системе по периодическим и продолжающимся
изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».
Переводные версии статей журнала входят
в Международный реферативный журнал
Chemical Abstracts.

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

Подписано в печать 19.10.2020.

Выход в свет 25.10.2020.

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 на обложке взято с сайта: <https://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, Ньютаунбиди, Вели-
кобритания)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бакиров И.К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический универ-
ситет, 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, Ека-
теринбург, 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 фи-
зико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск,
Беларусь)

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

Бурханов А.И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический уни-
верситет, 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. Ишлин-
ского Российской академии наук, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Топольский Н.Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный дея-
тель 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 Рос-
сии, Балашиха Московской обл., Россия)

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

Ю.Н. ШЕБЕКО
Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов
инфраструктуры водородной энергетики

5

Yu.N. SHEBEKO
Normative regulation of fire safety of infrastructural objects
of hydrogen energetics

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Т.С. СТАНКЕВИЧ, Д. ДАЛНЕР, М. ТРЧКА, А. ТОМИТЧЕК
Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре
в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с
использованием ANFIS

13

T.S. STANKEVICH, D. BALNER, M. TRCKA, A. THOMITZEK
Prompt forecasting of heat flows under fire conditions
in a vertical steel tank having an ANFIS
protective wall

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

И.Р. ХАСАНОВ, А.В. КАРПОВ, С.Ф. ЛОБОВА, Н.В. ПЕТРОВА
Полевое моделирование динамики пожара при ответе
на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации
своих функций

40

I.R. KHASANOV, A.V. KARPOV, S.F. LOBOVA, N.V. PETROVA
Field modeling of the fire dynamics as an answer
to the question about the fire alarm
performance

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRICAL ENGINEERING

М.В. АЛЕШКОВ, Д.А. ИОЩЕНКО, И.А. ОЛЬХОВСКИЙ
Пожары различных видов электроустановок
и способы их тушения

51

M.V. ALESHKOV, D.A. IOSHCENKO, I.A. OLKHOVSKY
Various electrical fires
and firefighting methods

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

М.Ю. УМРИХИНА, Т.О. ШОРОХОВА,
Л.А. ПЬЯНКОВА, А.А. КУДРЯВЦЕВ, С.В. УТКИН
Исследование старения огнезащитных
вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD
и ИК-спектроскопии

60

M.Yu. UMRIKHINA, T.O. SHOROKHOVA, L.A. PYANKOVA,
A.A. KUDRYAVTSEV, S.V. UTKIN
Using scanning electron microscopy, x-ray diffraction
and IR spectroscopy to study the ageing of intumescent
fire-proof coatings

И.В. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, И.А. ГОДУНОВ, Н.В. ЯШИН,
Ю.К. НАГАНОВСКИЙ, О.Н. ШОРНИКОВА
Кинетика вспенивания терморасширяющихся
огнезащитных составов

71

I.V. ARKHANGELSKY, I.A. GODUNOV, N.V. YASHIN,
Yu.K. NAGANOVSKII, O.N. SHORNIKOVA
The kinetics of intumescent flame
retardant foaming

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

Ю.И. ГОРБАНЬ, С.Г. НЕМЧИНОВ
Пожарные роботы в пожарной автоматике:
научно-технические исследования,
алгоритмы поведения и дизайн

82

Yu.I. GORBAN, S.G. NEMCHINOV
Fire-fighting robots are in the fire automation:
science and technology studies, the behavior
of algorithms and design

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

А.И. КИЦАК
Эффективность тушения пожара струйными системами
порошкового пожаротушения в условиях нестационарности
процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования
частицами порошка активных центров пламени

89

A.I. KITSAK
Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays
to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes
and heterogeneous inhibition of active flame centres by powder
particles

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Оценка риска в проектировании систем
молниезащиты зданий и сооружений

100

A.S. KHARLAMENKOV
Risk assessment in the design of lightning protection systems of
buildings and structures

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.



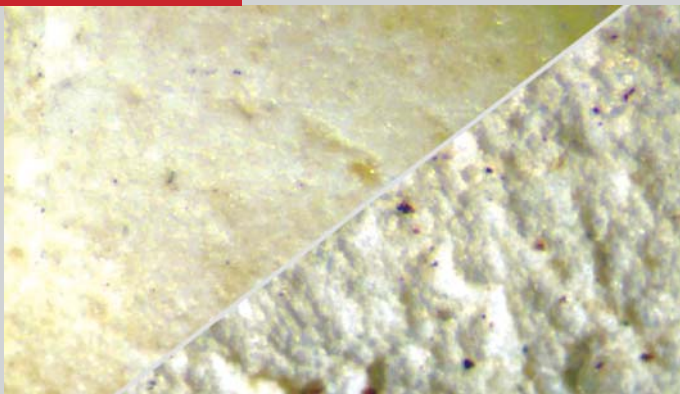
Прогнозирование теплового потока в стальном резервуаре

Стр. 13



Стр. 51

Пожары электроустановок и их тушение



Старение огнезащитных вспучивающихся покрытий

Стр. 60



Стр. 89

Тушения пожара струйными системами

Стр. 100



Оценка риска в проектировании систем молниезащиты



FOUNDER and PUBLISHER —

Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education Moscow
State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU)

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate El No.
FS 77-79403 on October 16, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Makhiyanova E.V.**

Corrector **Svetlichnaya L.V.**

Layout **Fedotov A.D.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

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

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

Signed for printing 19.10.2020.

Date of publication 25.10.2020.

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 – MGUSU

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.) (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 Engi-
neering, 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 Rus-
sian 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 Sci-
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,
Moscow Region, Russia)

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

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

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

Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики

© Ю.Н. Шебеко ✉

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России
(Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены российские и международные нормативные документы, отражающие специфические требования к объектам инфраструктуры водородной энергетики, к числу которых следует отнести объекты получения газообразного (GH_2) и сжиженного (LH_2) водорода, хранилища водорода (газообразного, сжиженного и в виде гидридов металлов), автозаправочные станции с использованием GH_2 и LH_2 в качестве моторного топлива, энергетические установки с применением водорода, предприятия по обслуживанию автомобилей на водородном моторном топливе.

Российские нормативные правовые и нормативные документы. Выявлено, что в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют нормативные правовые документы, регламентирующие достаточные требования к перечисленным выше объектам водородной энергетики, а существующие нормативные документы в указанной области весьма немногочисленны.

Стандарт NFPA 2. Среди международных нормативных документов, в первую очередь, следует отметить стандарт NFPA 2, детально регламентирующий требования пожарной безопасности для объектов инфраструктуры водородной энергетики. Однако далеко не все его положения могут быть использованы в Российской Федерации без соответствующей адаптации.

Выводы. На основе проведенного анализа представляется целесообразной следующая иерархия нормативных правовых и нормативных документов по безопасности объектов водородной энергетики. Во главе этой иерархии должен стоять нормативный правовой акт (федеральный закон или постановление Правительства), который формулирует общие требования к объектам водородной энергетики. Далее должна следовать серия нормативных документов добровольного применения (стандарты и своды правил). Указанные нормативные документы должны содержать требования к технологическому оборудованию, зданиям и сооружениям объектов водородной энергетики. Отдельно следует рассмотреть требования к эксплуатации рассматриваемых объектов. При этом необходимо отметить, что предлагаемые к разработке документы должны учитывать лучшую мировую практику (в частности, рассмотренный в настоящей работе стандарт NFPA 2).

Ключевые слова: объекты энергетики; газообразный водород; жидкий водород; нормативные правовые акты; стандарт, свод правил; стандарт NFPA 2

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 5–12. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.5-12

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

Normative regulation of fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics

© Yuriy N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Now many countries produce measures for a transfer of their economics to an application of a hydrogen energetics. Because of a high fire hazard of hydrogen a fire safety provision of infrastructural objects of the hydrogen energetics is a very important task. The infrastructural objects of the hydrogen energetics are the facilities aimed on a production and storage of hydrogen, transportation of gaseous (GH_2) and liquid (LH_2) hydrogen, an application of hydrogen for an energy generation, car refueling stations etc. Scientific basis for a creation of the fire safety normative documents was laid in studies of Russian and foreign investigators.

Russian normative documents. Russian normative documents in the area considered are analyzed in this work. A draft of the Technical Regulation on a safety of the facilities aimed on production, storage, transportation and application of hydrogen is the most important among them. This document contains a lot of specific require-

ments which should be used independently of a type of the hydrogen facility. Therefore this document can be considered as extremely "rigid" for a practical applications. A set of rules SP 162.1330610.2014 is aimed on the regulation of the safety requirements for the facilities using liquid hydrogen. The document PB 03-598-03 considers the safety requirements for a production of hydrogen by an electrolysis of water. A conclusion was made that Russian normative basis is not sufficient for a development of the hydrogen energetics.

Standard NFPA 2. The standard NFPA 2 can be considered as a most important normative document containing the safety requirements for the facilities for production, storage, transportation and application of hydrogen in a gaseous and a liquid phase. This standard contains both general and specific requirements for the infrastructural objects such as car refueling stations, storages of hydrogen in the gaseous and the liquid phase and also using metal hydrides, hydrogen production facilities, energy generation objects using hydrogen, technological equipment containing hydrogen, laboratory facilities, car parks for the cars using hydrogen as a fuel etc.

Conclusions. It was found that there is no comprehensive set of the normative documents regulating fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics. The series of the Russian normative documents in this area which should be created was proposed. A conclusion was made that the requirements of NFPA 2 can be used at a creation of the Russian normative basis of the hydrogen energetics.

Keywords: power engineering objects; gaseous hydrogen; liquid hydrogen; normative juridical acts; standards; set of rules; standard NFPA 2

For citation: Shebeko Yu.N. Normative regulation of fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):5-12. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.5-12 (rus.).

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

Введение

В настоящее время в развитых странах мира ведутся работы по переводу экономики на использование водородной энергетики. Эта отрасль энергетики включает в себя объекты получения и хранения водорода, его транспортировку, использование в энергетических установках и в качестве моторного топлива для автомобилей и железнодорожных локомотивов и т.п. Научная основа водородной энергетики была заложена в работах отечественных (см., например, [1–4]) и зарубежных (см., например, [5–13]) ученых. Рассмотрены аспекты пожаровзрывоопасности газообразного (GH_2) и сжиженного (LH_2) водорода, в том числе требования к объектам инфраструктуры водородной энергетики. Однако для практической реализации упомянутых достижений необходима разработка соответствующей нормативной базы, которая в нашей стране развита недостаточно по сравнению с развитыми странами.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является анализ требований пожарной безопасности к объектам инфраструктуры водородной энергетики, содержащимся в отечественных и зарубежных нормативных документах. При этом в качестве наиболее полного зарубежного нормативного документа рассмотрен стандарт NFPA 2 [14]. Российская нормативная база содержит относительно небольшое количество нормативных документов федерального уровня, регламентирующих специфические требования пожарной безопасности к объектам водородной энергетики [15, 16]. В то же время к указанным объектам в той или иной степени применимы нормативные документы общего характера (стандарты, своды правил).

Российские нормативные правовые и нормативные документы

В первую очередь, представляет интерес рассмотреть проект Федерального закона № 496165-4 «Технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода» (далее по тексту — Проект ФЗ), непосредственно относящегося к объектам с наличием водорода. Указанный документ устанавливает минимально необходимые требования безопасности, учитывающие специфику водорода. В указанном документе рассмотрены следующие вопросы:

- 1) требования по безопасному размещению водородных устройств и систем в зданиях и на открытых площадках;
- 2) общие требования безопасности для водородных устройств и систем (в том числе требования к конструктивному исполнению);
- 3) требования по безопасности систем с наличием жидкого водорода;
- 4) требования к безопасности электролизеров;
- 5) требования по безопасности устройств и систем компримирования водорода;
- 6) требования по безопасности газгольдеров для хранения водорода и водородсодержащих газов;
- 7) требования по безопасности систем наполнения и опорожнения баллонов с водородом;
- 8) требования по безопасности электрохимических генераторов водорода;
- 9) требования по безопасности бортовых систем хранения водорода на транспортных средствах;
- 10) требования по безопасности трубопроводов и арматуры водородных систем;

11) требования к устройствам безопасности водородных систем;

12) требования к системам контроля и управления;

13) требования к монтажу водородных устройств и систем;

14) требования к эксплуатации водородных устройств и систем;

15) требования к маркировке водородных устройств и систем;

16) подтверждение соответствия водородных устройств и систем обязательным требованиям.

В приложениях к проекту закона приведены данные по минимальным расстояниям от водородных систем до окружающих объектов (включая системы сжиженного водорода).

Наличие в Проекте ФЗ большого количества конкретных величин различных параметров (например, расстояний) может вызвать затруднения при проектировании, так как ранг этого документа (Федеральный закон) не допускает каких-либо отступлений от него. В этом плане представляется более логичным изложить соответствующие требования в своде правил, который, согласно Федеральному закону № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [17], является документом добровольного применения, т.е. допускает отступление от указанных требований с учетом положений ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [18].

В своде правил СП 162.1330610.2014 «Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода» [15] изложены требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. Данный свод правил распространяется на проектирование, строительство, монтаж, прием в эксплуатацию, расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию:

- производств, цехов, отделений и опытно-промышленных установок получения жидкого водорода;
- базисных и расходных хранилищ жидкого водорода;
- станций наполнения жидкого водорода и сливо-наливных устройств;
- испытательных комплексов, лабораторий и отдельных сооружений, где происходят испытания изделий, узлов и агрегатов, связанных с применением жидкого и газообразного водорода под давлением до 42 МПа;
- заправочных комплексов ракетно-космической техники;
- средств транспортирования.

Свод правил [15] уточняет и дополняет имеющиеся нормативные документы по отдельным специальным вопросам, которые состоят в следующем:

1) основные физические, химические, биологические свойства водорода (включая некоторые показатели пожарной опасности);

2) классификация установок жидкого водорода;

3) классификация хранилищ жидкого водорода;

4) требования к площадкам (станциям) наполнения и сливо-наливным (приемным) устройствам жидкого водорода;

5) классификация водородных испытательных комплексов изделий ракетно-космической техники;

6) состав водородных заправочных комплексов наземной космической инфраструктуры стартовых и испытательных комплексов;

7) классификация объектов и сооружений по степени пожаро- и взрывоопасности;

8) требования к генеральным планам объектов с наличием сжиженного водорода;

9) требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям зданий и сооружений;

10) требования к инженерным системам (вентиляция, отопление, водоснабжение, канализация и т.п.);

11) требования к вспомогательным зданиям и сооружениям;

12) требования к электрооборудованию;

13) требования к проектированию и монтажу технологического оборудования;

14) общие требования к аппаратам и предохранительным устройствам при производстве водорода;

15) требования к резервуарам и цистернам для жидкого водорода;

16) требования к системам и оборудованию испытательных комплексов;

17) требования к космическим заправочным комплексам;

18) требования пожарной безопасности к объектам с наличием сжиженного водорода;

19) требования к газоспасательной службе;

20) требования к охране труда и охране окружающей среды.

В своде правил [15] содержатся приложения, регламентирующие методику расчета безопасных расстояний при сооружении хранилищ жидкого водорода и стендовых комплексов, требования к конструкционным материалам, требования к газгольдерам низкого давления переменного объема, рекомендации по защите от статического электричества, требования пожарной безопасности к инфраструктуре обеспечения жидким водородом аэродромных комплексов.

Свод правил [15] достаточно подробно описывает требования безопасности к объектам с на-

личием жидкого водорода, однако в ряде случаев нормирует такие параметры, как категории помещений и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (что является предметом расчета в соответствии со сводом правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [19]), защиту от статического электричества и т.п., что регламентируется имеющимися нормативными документами (т.е. имеются элементы дублирования). Используются устаревшие обозначения классов взрывоопасных зон. СП 162.1330610.2014 [15] в основном направлен на обеспечение безопасности объектов ракетно-космической отрасли и в недостаточной степени рассматривает объекты другого назначения.

Вопросы безопасности при производстве водорода методом электролиза воды регламентированы в нормативном документе ПБ 03-598-03 «Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды» [16]. Данный документ устанавливает требования к взрывопожароопасным объектам, направленные на предупреждение аварий, случаев производственного травматизма на объектах, связанных с получением, обращением, применением и хранением электролитического водорода и кислорода.

Проектирование объектов, связанных с указанными выше процессами, должно проводиться с разделением технологической схемы на отдельные технологические блоки, обеспечивающие их минимальный уровень взрывоопасности. При разработке мероприятий по предотвращению взрывов и пожаров на рассматриваемых объектах должны учитываться нормативные требования пожарной безопасности. Нормативный документ [16] рассматривает следующие вопросы:

- требования к территории производства электролитического водорода;
- требования к зданиям, сооружениям и помещениям производства водорода;
- отопление, вентиляция и кондиционирование;
- водоснабжение и канализация;
- освещение;
- общие требования к безопасному ведению процессов;
- требования к расположению оборудования и рабочих мест;
- технологическое оборудование электролизных установок;
- предохранительные устройства и технологические выбросы;
- приготовление электролита;
- очистка и осушка газов;
- газгольдеры для водорода;

- компримирование водорода;
- наполнение и опорожнение баллонов с водородом;
- снабжение потребителей электролитическим водородом;
- требования к трубопроводам и арматуре;
- газоанализаторные участки;
- экспресс-лаборатории;
- требования к электротехническим устройствам;
- автоматизированные системы управления и средства противоаварийной защиты (ПАЗ);
- требования к эксплуатации производственных помещений.

Приложения к документу [16] содержат справочный материал, касающийся взрывопожарной и пожарной опасности, основных физико-химических свойств сырья и готовой продукции, терминов и определений и т.п. Кроме того, приложения включают в себя сведения о допустимых расстояниях между производственными зданиями и сооружениями.

Рассматривая документ [16] в целом, необходимо отметить, что он содержит довольно широкий круг требований, применимых, однако, только к объектам, связанным с производством электролитического водорода. Кроме того, представляется необходимым разделить требования к оборудованию, зданиям и сооружениям и требования к эксплуатации объектов и изложить их в разных документах, как это сделано в документах по пожарной безопасности (требования пожарной безопасности к эксплуатации объектов изложены в Правилах противопожарного режима в Российской Федерации [20], а требования пожарной безопасности к оборудованию, зданиям и сооружениям — в стандартах и сводах правил). Это связано с тем, что указанные требования имеют разную степень обязательности: имеются как нормативные правовые документы, подлежащие обязательному исполнению (например, [20]), так и документы добровольного применения (например, стандарты и своды правил).

Стандарт NFPA 2

Целью стандарта NFPA 2 [14] является изложение требований пожарной безопасности при получении, хранении, транспортировке и использовании водорода в газообразном и сжиженном виде. Рассмотрены как стационарные, так и мобильные системы, включая объекты инфраструктуры автомобильного транспорта. Требования стандарта [14] являются дополнительными к требованиям других нормативных документов, т.е. специфическими для объектов водородной энергетики. В случае несоответствия требований стандарта [14] и требований других нормативных документов следует использовать требования стандарта [14].

В первых частях стандарта излагаются общие требования безопасности к зданиям, сооружениям и технологическому оборудованию объектов инфраструктуры водородной энергетики. Эти требования должны гарантировать требуемый уровень безопасности людей, включая членов оперативных пожарных подразделений. Технологические процессы должны проводиться безопасным способом, обеспечивающим контроль и ликвидацию опасных факторов пожара и снижающим риск поражения персонала и населения, проживающего вблизи опасного объекта. В стандарте [14] используется концепция единичной проектной аварии и единичного пожара. Применительно к объектам допускается использование как «жесткого» (prescriptive codes), так и «гибкого» (performance based codes) нормирования.

На объекте разрешено применение, как правило, негорючих строительных и конструкционных материалов. В исключительных случаях допускаются горючие материалы с удельной теплотой сгорания не более 8141 кДж/кг. Заметная часть документа посвящена вопросам применения «гибкого» нормирования при проектировании объектов водородной энергетики. Квалификация персонала, применяющего подходы «гибкого» нормирования, должна быть признана надзорными органами. Надзорный орган может при необходимости направить проект, выполненный с применением «гибкого» нормирования, на независимую экспертизу.

В проекте, выполненном с применением «гибкого» нормирования, должны содержаться критерии допустимости проектных решений, описаны использованные сценарии аварий и пожаров, а также примененные методы расчета и модели процессов, протекающих при авариях и пожарах. Указанный проект, одобренный надзорным органом, должен быть представлен в подразделение пожарной охраны для составления плана пожаротушения. В проекте должны быть предусмотрены меры по защите персонала объекта от опасных факторов пожара, а также меры по обеспечению действий оперативных пожарных подразделений. Сформулированы требования к выбору сценариев проектных аварий и пожаров, которые должны быть приняты во внимание при проектировании. Документация, представляемая в надзорный орган, должна содержать:

- описание объекта, включая данные о наличии и размещении людей на объекте и вблизи него;
- критерии безопасности;
- сценарии проектных аварий и пожаров;
- исходные данные для моделирования;
- выходные данные, в том числе оценку их чувствительности к неопределенностям исходных

данных, и применяемые коэффициенты безопасности;

- применяемые требования нормативных документов;
- описание использованных моделей с результатами их апробации;
- выводы по результатам моделирования.

Помещения с наличием резервуаров со сжиженным и газообразным водородом должны быть оборудованы спринклерными системами водяного орошения при объеме сжиженного водорода более 170 л и газообразного водорода более 112 м³, а также вытяжной вентиляцией вне зависимости от объема хранения. Повышенная надежность электроснабжения должна быть предусмотрена для вентиляции, приборов контроля температуры, систем оповещения об аварии или пожаре, системы обнаружения пожара и газа. Для технологических систем со сжиженным водородом следует применять приборы обнаружения утечек жидкого продукта, дренажные системы, запасные резервуары, поддоны и обвалования. Выбросы из предохранительных клапанов должны направляться через сбросные трубы непосредственно наружу. Сброс из трубы должен осуществляться на высоте не менее 3 м от поверхности земли, 0,6 м над технологическим оборудованием и 1,5 м над покрытием зданий и сооружений вдали от мест массового пребывания людей, потенциальных источников зажигания, забора воздуха приточной вентиляции и проемов зданий. Удельная (на 1 м² пола) производительность вентиляции должна быть не менее 0,0051 м³/(с·м²).

В стандарте [14] сформулированы специфические требования для объектов с наличием сжиженного водорода. При размещении резервуаров со сжиженным водородом следует руководствоваться следующими требованиями:

- резервуары должны располагаться на расстоянии не менее 6,1 м от мест размещения других горючих веществ и материалов и на расстоянии не менее 7,6 м от невзрывозащищенного электрооборудования и иных потенциальных источников зажигания;
- резервуары должны располагаться на расстоянии не менее 15 м от мест забора воздуха системами приточной вентиляции и хранилищ других горючих газов;
- резервуары должны быть защищены от механических повреждений.

Помещения, где размещены резервуары со сжиженным водородом, должны быть отделены противопожарными преградами с пределом огнестойкости не менее 2 ч. Резервуары со сжиженным водородом не допускается размещать внутри обвалований хранилищ других жидких горючих веществ.

Необходимо предусматривать дренажные системы для предотвращения скопления пролитого продукта под резервуарами для его хранения. Опоры под резервуарами хранения сжиженного водорода высотой более 457 мм должны иметь предел огнестойкости не менее 2 ч. Резервуары хранения LH_2 должны быть двухоболочечными с вакуумной теплоизоляцией, причем внешняя оболочка должна быть рассчитана на давление не ниже 207 кПа. Резервуары объемом более 7570 л должны быть оборудованы дистанционно управляемой запорной арматурой. Подземные трубопроводы для транспортировки LH_2 должны иметь вакуумную теплоизоляцию. В стандарте [14] представлены детальные требования к размещению резервуаров для хранения сжиженного водорода на открытых площадках.

Кроме изложенных выше общих требований, стандарт [14] содержит специфические требования к отдельным объектам инфраструктуры водородной энергетики, таким, как автозаправочные станции для GH_2 и LH_2 , хранилища водорода с использованием гидридов металлов, объекты получения водорода, энергетические установки с применением водорода в качестве топлива, технологическое оборудование с водородным охлаждением, лабораторное оборудование, автомобильные парковки для автомобилей с использованием водородного моторного топлива, предприятия по обслуживанию упомянутых выше автомобилей.

В приложениях к стандарту [14] приведены данные по физическим и пожароопасным свойствам водорода, требования по охране труда на предприятиях инфраструктуры водородной энергетики, методы определения допустимых расстояний между резервуарами хранения водорода, особенности систем обнаружения утечек водорода и т.п.

Выводы

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы. В настоящее время

в Российской Федерации отсутствуют нормативные правовые акты, в достаточной степени регламентирующие безопасность объектов водородной энергетики. Имеющийся Проект ФЗ содержит необоснованно детальный перечень требований, от которых при проектировании в силу обязательности нормативного правового акта отступать нельзя, хотя такие отступления, как показала практика, неизбежно потребуются при проектировании конкретных объектов. Поэтому нормативный правовой акт, будь то Федеральный закон или постановление Правительства, должен иметь более общий вид. Все детальные требования при этом должны быть изложены в документах добровольного применения (стандартах и сводах правил). Имеющиеся же нормативные документы [15, 16] хотя и содержат ряд полезных требований, тем не менее относятся к достаточно специфическим случаям применения жидкого водорода и производству водорода методом электролиза воды.

В связи с вышеизложенным, представляется целесообразной следующая иерархия нормативных правовых и нормативных документов по безопасности объектов водородной энергетики. Во главе этой иерархии должен стоять нормативный правовой акт (Федеральный закон или постановление Правительства), который формулирует общие требования к объектам водородной энергетики. Далее должна следовать серия нормативных документов добровольного применения (стандарты и своды правил). Указанные нормативные документы должны содержать требования к технологическому оборудованию, зданиям и сооружениям объектов водородной энергетики. Отдельно следует рассмотреть требования к эксплуатации рассматриваемых объектов. Подобно документу [20], это может быть постановление Правительства. При этом необходимо отметить, что предлагаемые к разработке документы должны учитывать лучшую мировую практику (в частности, рассмотренный в настоящей работе стандарт NFPA 2 [14]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макеев В.И.* Безопасность объектов с использованием криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 3. С. 34–45.
2. *Болодьян И.А., Кестенбойм Х.С., Махвиладзе Г.М., Макеев В.И., Федотов А.П., Чугуев А.П.* Взрывопожароопасность низкотемпературных облаков водорода в атмосфере // Горение гетерогенных и газовых систем : мат. 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. 12–24 нояб. 1989 г., Суздаль. Черноголовка : ОИХФ, 1989. С. 15–17.
3. *Карпов В.Л.* Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 1. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в неподвижной атмосфере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 3. С. 36–43.
4. *Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М.* Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // Химическая промышленность. 1988. № 12. С. 728–731.

5. Dadashzadeh M., Makarov D., Molkov V. Modelling of hydrogen tank fuelling // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019. Pp. 1396–1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. Gocalp I. A holistic approach to promote the safe development of hydrogen as energy vector // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019. Pp. 1387–1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127
7. Andersen J., Gronkvist S. Large-scale storage of hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 23. Pp. 11901–11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063
8. Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E., Popoola O.M. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendations // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 29. Pp. 15072–15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. Gue H.R., Seo S.K., Bach Q.V., Ha D., Lee C.J. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 2. Pp. 1288–1298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
10. Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V. Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V. 44. No. 17. P. 8927–8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
11. Sakamoto J., Nakayama J., Nakarai T., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. No. 3. Pp. 2096–2104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039
12. Nakayama J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 17. Pp. 9110–9119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.177
13. Azuma M., Oimatsu K., Oyama S., Kamiya S., Igashira K., Takemura T. et al. Safety design of compressed hydrogen trailers with composite cylinders // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39. No. 25. Pp. 20420–20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
14. NFPA 2. Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition. Quincy : NFPA, 2016.
15. СП 162.1330610.2014. Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200124842> (дата обращения 27.08.2020).
16. ПБ 03-598-03. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды : утв. Приказом Ростехнадзора от 06.06.2003 № 75. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/901865925> (дата обращения 27.08.2020).
17. О техническом регулировании : Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/901836556> (дата обращения 27.08.2020).
18. Федеральный закон от 22.07.2008 (№ 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». М. : ВНИИПО, 2015. 148 с.
19. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности // Пожарная безопасность. 2011. № 1. С. 18–38.
20. Правила противопожарного режима в Российской Федерации : утв. Постановлением Правительства от 25.04.2012 № 390 // Пожарная безопасность. 2012. № 3. С. 5–53.

REFERENCES

1. Makeev V.I. Safety of objects using liquid cryogenic products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):34-45. (rus.).
2. Bolodian I.A., Kestenboym H.S., Makhviladze G.M., Makeev V.I., Fedotov A.P., Chuguev A.P. Fire and explosion safety of low temperature clouds of hydrogen in the atmosphere. *Combustion of Heterogenic and Gaseous Systems : Proceedings of the IX All Union Symposium on Combustion and Explosion*. Chernogolovka, OIHF, 1989; 15-17. (rus.).
3. Karpov V.L. Fire and explosion safety of order and accidental releases of flammable gases. Part 1. Limiting conditions of stable burning and extinguishing of jet flames in still atmosphere. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(3):36-43. (rus.).
4. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume. *Khimicheskaya Promyshlennost — Chemical Industry*, 1988; 12:728-731. (rus.).

5. Dadashzadeh M., Makarov D., Molkov V. Modelling of hydrogen tank fuelling. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21-26 April 2019, Saint Petersburg, Russia.* Saint Petersburg, 2019; 1396-1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. Gocalp I. A holistic approach to promote the safe development of hydrogen as energy vector. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21-26 April 2019, Saint Petersburg, Russia.* Saint Petersburg, 2019; 1387-1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127
7. Andersen J., Gronkvist S. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019; 44(23):11901-11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063
8. Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E., Popoola O.M. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendations. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019; 44(29):15072-15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. Gue H.R., Seo S.K., Bach Q.V., Ha D., Lee C.J. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019; 44(2):1288-1298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
10. Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V. Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019; 44(17):8927-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
11. Sakamoto J., Nakayama J., Nakarai T., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2016; 41(3):2096-2104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039
12. Nakayama J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2019; 44(17):9110-9119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.177
13. Azuma M., Oimatsu K., Oyama S., Kamiya S., Igashira K., Takemura T. et al. Safety design of compressed hydrogen trailers with composite cylinders. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2014; 39(25):20420-20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
14. NFPA 2. Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition. Quincy : NFPA, 2016.
15. SP 162.1330610.2014. *Safety requirements at production, storage, transportation and application of liquid hydrogen.* URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200124842> (Accessed 27.08.2020) (rus.).
16. PB 03-598-03. *Safety rules at production of hydrogen using the method of a water electrolysis.* Stated by Order of Rostekhnadzor of Russia from 6.06.2020 No. 75. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/901865925> (Accessed 27.08.2020) (rus.).
17. Federal Law from 27.12.2002 No. 184-FZ "On a technical regulation". URL: <http://docs.cntd.ru/document/901836556> (Accessed 27.08.2020) (rus.).
18. Federal Law from 22.07.2008 No. 123-FZ "Technical regulation on fire safety requirements". Moscow, VNIPO publ., 2015; 148. (rus.).
19. SP 12.131.2009. Determination categories of rooms, buildings and external facilities on fire and explosion hazard. *Fire Safety.* 2011; 1:18-38. (rus.).
20. Fire safety rules in Russian Federation. Statement of Government from 25.04.2012 No. 390. *Fire Safety.* 2012; 3:5-53. (rus.).

Поступила 12.08.2020, после доработки 27.08.2020;

принята к публикации 08.09.2020

Received August 12, 2020; Received in revised form August 27, 2020;

Accepted September 8, 2020

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the author

Yury N. SHEBEKO, Doctor Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием ANFIS

© Т.С. Станкевич^{1, 2} ✉, Д. Далнер³, М. Трчка³, А. Томитчек³

¹ Калининградский государственный технический университет (Россия, 236022, г. Калининград, Советский пр-т, 1)

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Россия, 101000, г. Москва, Мясницкая ул., 20)

³ Высшая горно-металлургическая школа — Остравский технический университет (Чешская Республика, 708 00, г. Острава-Поруба, 17 Листопаду, 2172/15)

АННОТАЦИЯ

Введение. Резервуары и резервуарные парки широко распространены во многих субъектах Российской Федерации и являются одним из важнейших элементов технологической схемы добычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов. Проблема обеспечения пожарной безопасности резервуарных парков, соответствующих, согласно риск-ориентированной модели безопасности, наиболее высоким уровням риска, является актуальной как на российском, так и на мировом уровнях. В связи с развитием в течение последних десятилетий информационных и коммуникационных технологий и их внедрением в процессы функционирования и управления различными объектами появились передовые методы прогнозирования возникновения и развития чрезвычайных ситуаций на объектах, оптимизации управленческих решений при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе и пожаров.

Цели и задачи. В работе авторы представляют разработанную ими модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе искусственных нейронных сетей для повышения безопасности персонала пожарной охраны при тушении пожара на наземном вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой. В исследовании особое внимание авторы уделяют выявлению зависимости теплового потока от ветровой нагрузки.

Методы. Для достижения указанной цели авторами организована и проведена серия экспериментов, осуществлен сбор экспериментальных данных о тепловом потоке и сформированы обучающие и тестовые выборки.

Результаты. Посредством построения искусственных нейронных сетей ANFIS выполнено определение зависимостей теплового потока от факторов внешней среды. Произведено сравнение различных типов функций принадлежности, методов оптимизации и методов генерирования системы и установлено, что для сетей ANFIS, выполняющих прогнозирование теплового потока без учета и с учетом ветровой нагрузки, оптимальным является применение метода субкластеризации и гибридного метода оптимизации, что обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках.

Обсуждение. Результаты анализа показывают, что скорость ветра и расположение резервуара могут привести к повышению температуры воздуха, стенки резервуара и бензина. Поэтому, несмотря на сложность анализа, регистрация всех этих факторов позволяет прогнозировать безопасное для пожаротушения расстояние от горящего резервуара.

Выводы. Научное исследование позволило разработать модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе использования элементов искусственного интеллекта (сетей ANFIS). Полученные в ходе работы результаты позволяют повысить эффективность оперативного прогнозирования динамики развития пожаров в резервуарах и резервуарных парках и оптимизацию процессов принятия управленческих решений ответственными лицами.

Ключевые слова: пожарная безопасность; бензин; физическая модель; ветровая нагрузка; искусственные нейронные сети

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Разработка модели пожара для оценки риска на особо опасных и технически сложных объектах», Остравский технический университет, Чешская Республика, 2018–2019 гг.

Для цитирования: Станкевич Т.С., Далнер Д., Трчка М., Томитчек А. Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием ANFIS // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 13–39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39

✉ Станкевич Татьяна Сергеевна, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Введение

В настоящее время мировое сообщество все большее внимание уделяет обеспечению безопасности человека и устойчивому развитию человечества во взаимодействии с окружающей средой. Глобаль-

ной проблемой, вызывающей озабоченность во всем мире, является возрастание пожарной опасности ряда объектов, относящихся к стратегически важным для национальной безопасности государства объектам топливно-энергетического комплекса.

Актуальность проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов топливно-энергетической сферы обусловлена тем, что именно энергетика является основной отраслью промышленности любого государства. Кроме того, энергетика имеет решающее межотраслевое значение, поскольку уровень и качество добычи, производства и поставок энергоресурсов определяют условия производственной деятельности страны и обслуживания населения.

В настоящее время в России, как указано в Единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС)¹, насчитывается 8139 резервуаров для хранения нефтепродуктов общей вместимостью 16 512,17 тыс. м³ и 772 резервуара для хранения нефти общей вместимостью 5590,58 тыс. м³. Согласно итоговым отчетам Минэнерго России за 2018 г.² и за 2019 г.³, в российской нефтяной отрасли в 2018 г. введено в эксплуатацию 54 месторождения, в 2019 г. — 31 месторождение, в 2018 г. общая протяженность новых магистральных нефтепроводов составила 216 км, в 2019 г. — 324 км. Рост переработки нефти для внутреннего использования и для вывоза за рубеж сопровождается строительством крупных нефтебаз с большими объемами резервуаров на территории страны. Так, в Российской Федерации активно строятся резервуарные парки с резервуарами объемом до 50 тыс. м³, и в то же время ведутся работы по проектированию резервуаров объемом до 100 тыс. м³.

Рост объемов добычи нефти и активное развитие нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России увеличивают количество

пожаров, способствуя росту их масштабов и наносимому ими ущербу. За период с 2007 по 2016 гг., как указано в [1], произошло 126 чрезвычайных ситуаций. Динамика возникновения различных типов чрезвычайных ситуаций (пожар, взрыв или выброс) представлена на рис. 1. За десятилетний период произошло 65 пожаров, 46 взрывов и 15 выбросов опасных веществ, что составляет от общего количества инцидентов 52, 36 и 12 %, соответственно (рис. 2). Среди пожаров на нефтебазах 93,4 % пожаров и аварий зафиксировано на наземных резервуарах, из которых 53,9 % — на резервуарах для хранения бензина; 32,1 % — на резервуарах для хранения сырой нефти; 14,0 % — на резервуарах, используемых для хранения других видов нефтепродуктов (дизельное топливо, керосин, мазут и т.д.).

Согласно [2], риски различных происшествий на резервуарах в России достаточно высоки. Например, риск возникновения пожара дыхательной арматуры и в зеркале нефтепродукта составляет $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, что в 90 раз выше рекомендованного уровня 10^{-6} , указанного в ГОСТ 12.1.004-91⁴.

Несмотря на то, что статистические данные об авариях на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей демонстрируют снижение частоты возникновения пожаров и уменьшение количества пострадавших людей при пожарах, цифры неутешительны и превышают аналогичные показатели в Европе, представленные в Major Accident Reporting System (eMARS)⁵, и США, содержащиеся в данных National Fire Protection Association⁶.

¹ ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/>

² Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2018 году. Задачи на среднесрочную перспективу. URL: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf

³ Итоги работы Минэнерго России в 2019 году и основные задачи на 2020 год. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/18288>

⁴ ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

⁵ eMARS. URL: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>

⁶ National Fire Protection Association. U.S. fire problem. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/US-Fire-Problem>

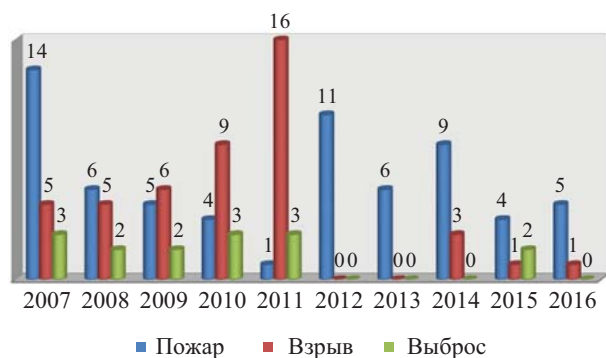


Рис. 1. Количество чрезвычайных ситуаций на объектах нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России за период с 2007 по 2016 гг.

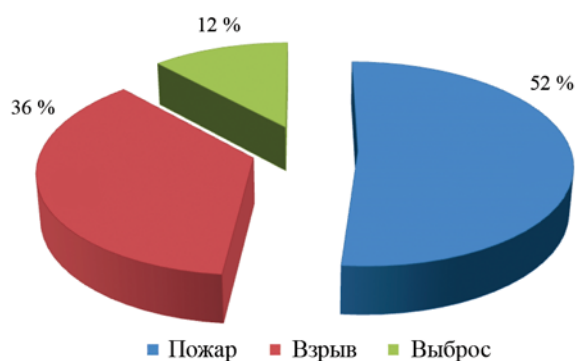


Рис. 2. Распределение типов чрезвычайных ситуаций на объектах нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России за период с 2007 по 2016 гг.

Возникновение пожаров в хранилищах нефти и нефтепродуктов и их распространение несет существенную угрозу для жизни и здоровья граждан, а также оказывает негативное воздействие на окружающую среду (вплоть до катастрофических значений). Пожары на объектах топливно-энергетической сферы характеризуются обширной зоной развития горения, мощным тепловым излучением в окружающую среду, при этом высота светящейся части пламени в 1–2 раза превышает диаметр горящего резервуара [3]. В случае пожара огонь распространяется с большой скоростью, горение сопровождается взрывами и выбросами горячей жидкости. Пожары в резервуарах носят затяжной характер, и для полной ликвидации пожара может потребоваться от нескольких часов до нескольких дней и большое количество сил и средств [3]. Особенно опасны пожары на нефтебазах и нефтехранилищах, поскольку нагрев соседних резервуаров может стать причиной каскадного развития пожара.

Таким образом, повышение пожаро- и взрывобезопасности резервуаров и резервуарных парков является важной и актуальной проблемой. Работа в этом направлении обеспечивает более высокий уровень защиты населения и окружающей среды от угроз техногенного характера. Для изучения выбранны резервуарные парки для хранения бензина, так как именно в них сконцентрировано максимальное количество горючей жидкости и существует высокая вероятность распространения огня на соседние резервуары. Выбор вида топлива (бензина) обусловлен результатами анализа статистических данных о пожарах на объектах хранения нефти и нефтепродуктов (более половины аварийных ситуаций происходят в наземных резервуарах для хранения бензина).

В данном исследовании предлагается рассмотреть парк с вертикальными стальными резервуарами с защитной стенкой. Это связано с тем, что этот тип хранилищ является многообещающей тенденцией в строительстве новых или расширении существующих складов нефти и нефтепродуктов.

Целью исследования является повышение безопасности персонала пожарной охраны при тушении пожара на наземном вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой путем разработки модели прогнозирования динамики развития пожара (теплового потока) на основе искусственных нейронных сетей.

Материалы и методы

Процессы горения жидкостей активно изучаются российскими и зарубежными учеными. В качестве примера можно привести работу В.И. Блинова, Г.М. Худякова и И.И. Петрова [4], в ходе которой

авторами проводились комплексные исследования процессов горения нефти и нефтепродуктов и механизмов тушения веществ. Естественным продолжением указанной работы стали совместные исследования И.И. Петрова и В.Ч. Реутта [5], в которых особое внимание уделялось установлению критических условий потухания пламени нефтепродукта при его перемешивании в резервуаре. Вопросы пожарной безопасности в резервуарных парках исследовались О.М. Волковым и Г.А. Проскуряковым [6], а именно причины возникновения и развития пожаров на объектах, основные мероприятия по предупреждению и тушению пожаров нефти и нефтепродуктов. Ю.А. Абрамов и А.Е. Басманов в работе [7] рассмотрели детерминированную и стохастическую модели постановки задачи оптимального расположения и выбора боевых задач для пожарных стволов при локализации пожара в резервуарном парке. Ими предложены метод и алгоритм решения сформулированной задачи как в детерминированном, так и в стохастическом виде. В исследовании [8] Zabetakis M.G. и Burgess D.S. рассматривали вопрос испарения жидкого водорода с точки зрения теории теплопередачи и экспериментально определяли распределение легковоспламеняющихся смесей над зоной разлива. В процессе экспериментов выполнялось воспламенение паров водорода над сосудом Дьюара и воспламенение паровоздушной смеси над зоной разлива в различное время после разлива различного количества (до 90 л) жидкого водорода. Markstein G.H. в работах [9, 10] описал результаты экспериментов по измерению общего лучистого излучения на свободно горящем пламени щелевой горелки и на струйном факеле (топливо — метан, этан, этилен и пропилен с общей скоростью тепловыделения), провел измерения лучистого теплообмена и теплопередачи от горения метана, этана, этилена и пропилена на вертикальной поверхности пористого металла.

Форму пламени и тепловой поток описывал в своих работах Drysdale D. [11]. Также в литературе представлены некоторые экспериментальные исследования, связанные с пожарами в резервуарах для хранения топлива или пожарами в бассейнах. Например, в работе Babrauskas V. [12] содержатся экспериментальные данные по скоростям горения бензина, сжиженного природного газа и спирта для бассейнов диаметром от 0,2 до 7,0 м. Munoz M. в работе [13] проведены термографические измерения при пожарах в бассейнах с бензином и дизельным топливом диаметром от 1,5 до 6,0 м. В работе [14] описаны эксперименты по пожаротушению в бассейнах (диаметр 3,0 м) для измерения массовых скоростей горения. Особенности развития пожаров в резервуарах типа «стакан в стакане» описаны в ра-

ботах [15, 16]. Влияние тепловых нагрузок пожара в нефтяном резервуаре на ближайшие резервуары представлено в статье [17].

На основании анализа литературных источников можно сделать вывод, что в основном эксперименты проводятся без учета влияния ветровой нагрузки (при скорости ветра 0 м/с), в работах большинства исследователей либо не учитывается влияние ветра на тепловой поток при пожаре, либо использует упрощенные соотношения.

Поскольку процессы горения, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, необходимо тщательно изучить процесс развития пожара в резервуаре при различной ветровой нагрузке, чтобы выбрать средства защиты резервуара и разработать рекомендации о том, как проводить действия пожарных подразделений по тушению пожара.

Недавний прорыв в развитии искусственного интеллекта, больших данных и машинного обучения создал беспрецедентные возможности для перехода к передовым интеллектуальным системам, обеспечивающим обработку большого объема информации различной природы и формирующим управленческие решения в неформализуемых и слабоформализуемых критических ситуациях обеспечения безопасности объектов. Однако подобные инструменты активно применяются на практике именно в областях маркетинга, социальных сетей, бизнеса, медицине, на производстве указанные методы используются ограниченно.

В представленной работе авторами предложено использовать элементы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети) для обработки данных эксперимента по моделированию пожара в резервуаре на территории резервуарного парка, что соответствует приоритетам и перспективам научно-технологического развития России согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Стратегии НТР РФ).

В исследовании использована адаптивная система нейро-нечеткого вывода (adaptive network-based fuzzy inference system — ANFIS) [18] для прогнозирования динамики пожара в основном резервуаре. Выбор сети ANFIS обусловлен тем, что данный тип сетей обеспечивает меньшую среднеквадратичную ошибку RMSE по сравнению с другими нейро-нечеткими системами. Кроме того, сети ANFIS очень эффективны для решения задач прогнозирования [19].

С точки зрения архитектуры, сеть ANFIS — это пятислойная сеть с узлами, каждый из которых имеет специализированную функциональность. Функция узла каждого входа определяется по формуле (1) [18]:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(P_j), \quad (1)$$

где P_j — входные данные для узла i ;

A_i — функция принадлежности.

Для обобщенной колоколообразной функции используется формула (2)⁷:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{P_j - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad (2)$$

где a_i — коэффициент концентрации функции принадлежности;

b_i — коэффициент крутизны функции принадлежности;

c_i — координата максимума функции принадлежности.

Для гауссовой функции применяется формула (3)⁸:

$$\mu_A(P_j) = e^{-\frac{(P_j - b_i)^2}{2c_i^2}}, \quad (3)$$

где b_i — координата максимума функции принадлежности;

c_i — коэффициент концентрации функции принадлежности.

Для гауссовой комбинированной функции применяются формулы (4)–(5)⁹:

если $c_{1,i} < c_{2,i}$, то

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{1,i}, \\ 1, & c_{1,i} \leq P_j \leq c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{2,i}; \end{cases} \quad (4)$$

если $c_{1,i} > c_{2,i}$, то

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{1,i}(c_{2,i})$ — минимальное (максимальное) значение ядра нечеткого множества;

$a_{1,i}(a_{2,i})$ — коэффициент концентрации левой (правой) части функции принадлежности.

⁷ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gbellmf.html>

⁸ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gaussmf.html>

⁹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gauss2mf.html>

Для треугольной функции расчет производится по формуле (6)¹⁰:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ \frac{c_i - P_j}{c_i - b_i}, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ 0, & c_i \leq P_j, \end{cases} \quad (6)$$

где $[a_i, c_i]$ — диапазон изменения переменной;

b_i — наиболее вероятное значение переменной.

Для трапециевидной функции применяется формула (7)¹¹:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ \frac{d_i - P_j}{d_i - c_i}, & c_i \leq P_j \leq d_i, \\ 0, & d_i \leq P_j, \end{cases} \quad (7)$$

где $[a_i, d_i]$ — пессимистическая оценка значений переменной;

$[b_i, c_i]$ — оптимистическая оценка значений переменной.

Для разности между двумя сигмоидальными функциями принадлежности используется формула (8)¹²:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} - \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (8)$$

Для пи-образной функции принадлежности применяется формула (9)¹³:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i \\ 2 \left(\frac{P_j - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, & a_i \leq P_j \leq \frac{a_i + b_i}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - b_i}{b_i - a_i} \right)^2, & \frac{a_i + b_i}{2} \leq P_j \leq b_i \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - c_i}{d_i - c_i} \right)^2, & c_i \leq P_j \leq \frac{c_i + d_i}{2} \\ 2 \left(\frac{P_j - d_i}{d_i - c_i} \right)^2, & \frac{c_i + d_i}{2} \leq P_j \leq d_i \\ 0, & P_j \geq d_i \end{cases} \quad (9)$$

Расчет произведения двух сигмоидальных функций принадлежности выполняется по формуле (10)¹⁴:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (10)$$

Для изучения влияния теплового потока на основную и защитную стенки объекта и на соседние резервуары при различных ветровых нагрузках в рамках исследований для резервуара с защитной стенкой выполнено моделирование пожара, вызванного горением бензина в основном резервуаре.

Авторами проводился эксперимент с использованием модели реального объекта — резервуара объемом 125 тыс. м³. Геометрические размеры модели представлены в табл. 1, на рис. 3 наглядно изображена схема модели, на рис. 4 представлены фотографии модели. Общий объем жидкости (топливо + водяной балласт) соответствует 80 % вместимости бака. Выбор данной вместимости обусловлен тем, что заполнение объема резервуара на 80 % является типичным вариантом заполнения. Используемая марка стали модели — S590, она соответствует марке стали реального резервуара с защитной стенкой объемом 125 тыс. м³.

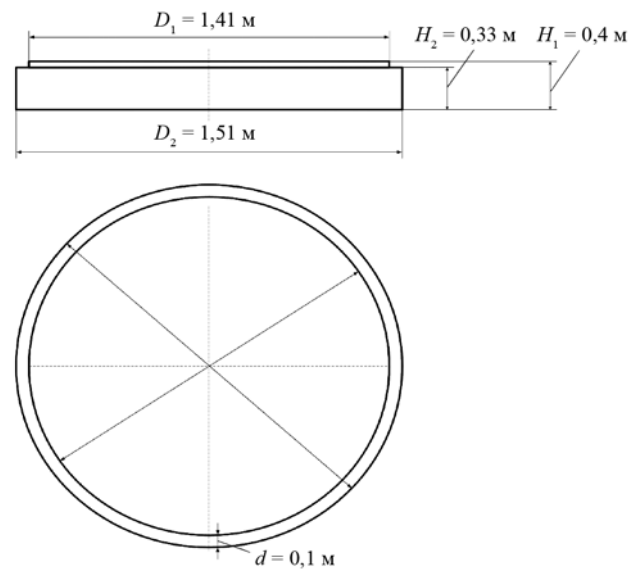


Рис. 3. Схема (вид сбоку и вид сверху) физической модели: D_1 — диаметр основного резервуара, м; D_2 — диаметр защитного резервуара, м; d — ширина межстенного пространства, м; H_1 — высота основного резервуара, м; H_2 — высота защитного резервуара, м

При каждом испытании и диаметре основного бака количество сжигаемого топлива составляло 0,499 м³. Как указано в [20], присутствие воды под топливом может влиять на характеристики сгорания при кипении (внезапное испарение воды), которое

¹⁰ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trimf.html>

¹¹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trapmf.html>

¹² MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/dsimgf.html>

¹³ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/pimf.html>

¹⁴ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/psimgf.html>



Рис. 4. Модель резервуара с защитной стенкой

зависит от типа топлива и количества топлива над водой. Однако это явление не наблюдалось во время продолжающихся экспериментов.

Таблица 1. Геометрические параметры физической модели

Параметр	Реальный объект	Физическая модель
Диаметр защитного резервуара, м	90,47	1,51
Диаметр основного резервуара, м	84,47	1,41
Высота защитного резервуара, м	20,00	0,33
Высота основного резервуара, м	24,10	0,40
Толщина стенки и днища резервуара, м	0,06...0,26	0,002

Температура окружающей среды во время испытаний составляла 0 °С, атмосферное давление — 1 атм. Поскольку резервуар был открыт сверху (без крыши), то эти эксперименты похожи на пожары в бассейне.

В процессе моделирования пожара авторами выбраны значения наиболее характерных для июля ветров (июль — самый опасный период для обеспечения пожарной безопасности хранилищ нефти и нефтепродуктов). Учтено, что, как указано в [15], максимальная скорость ветра при численном моделировании не должна превышать 10 м/с, поскольку угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра и длина пламени больше не изменяются значительно с дальнейшим увеличением скорости ветра. Эксперименты с физической моделью проводились в помещении при различных ветровых нагрузках: эксперименты № 1, 2, 10 и 11 — без ветровой нагрузки; эксперимент № 3 — скорость ветра 1,9 м/с; эксперименты № 4 и 5 — 1,3 м/с; эксперименты № 6 и 7 — 0,9 м/с; эксперимент № 8 — 4 м/с; эксперимент № 9 — 4,4 м/с.

В ходе экспериментов использованы датчики теплового потока, характеристики которых более подробно представлены в табл. 2. Расположение датчиков теплового потока SBG01 показано на рис. 5–8. Более подробная информация о датчиках доступна в инструкции¹⁵.

¹⁵ User manual SBG01. Water cooled heat flux sensor. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SBG01_manual_v1722.pdf

Таблица 2. Датчики теплового потока

Номер эксперимента	Диапазон измерения датчика, кВт/м ²	Расстояние от центра резервуара до датчика, м	Угол наклона датчика от горизонтали, направленной вверх, град	Высота датчика от земли, м
1	0...100	1,56	50	0,4
2	0...100	2,00	33	0,4
3	0...200	1,26	56	0,4
4	0...50	2,80	27	0,4
5	0...50	2,80	27	0,4
6	0...100	1,26	56	0,4
7	0...100	1,26	56	0,4
8	0...100	1,26	56	0,4
9	0...100	1,56	50	0,4
10	0...100	1,56	50	0,4
11	0...100	1,56	50	0,4

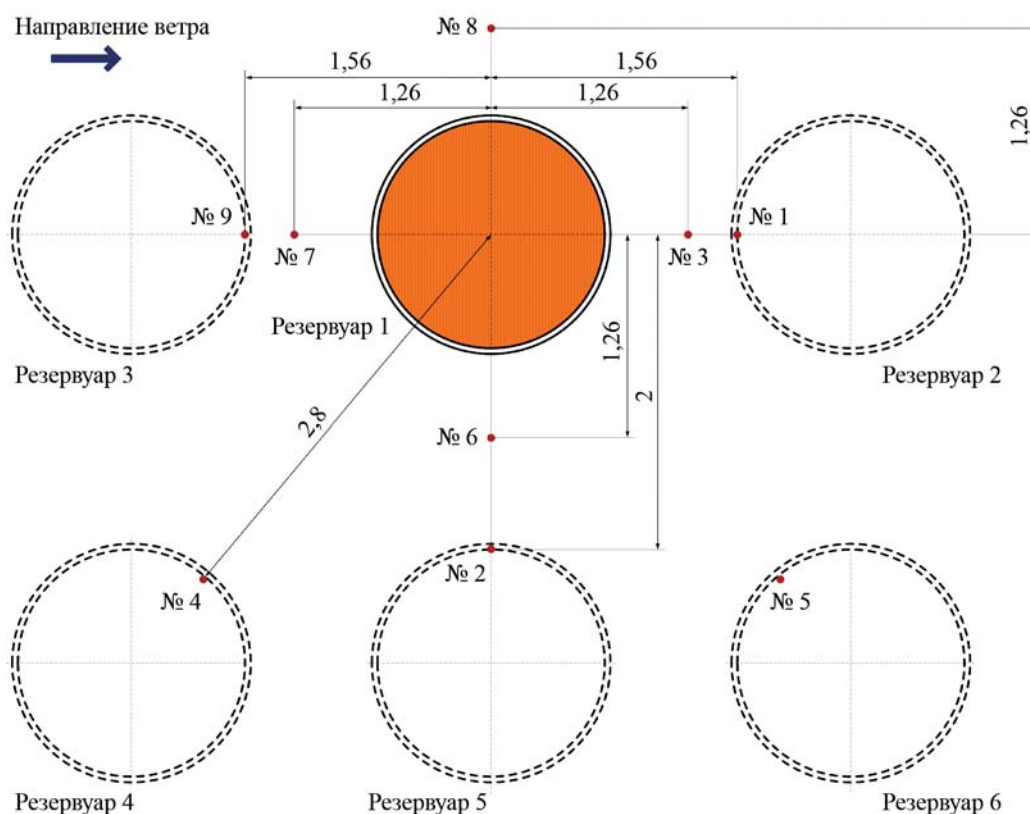


Рис. 5. Датчики теплового потока (вид сверху)

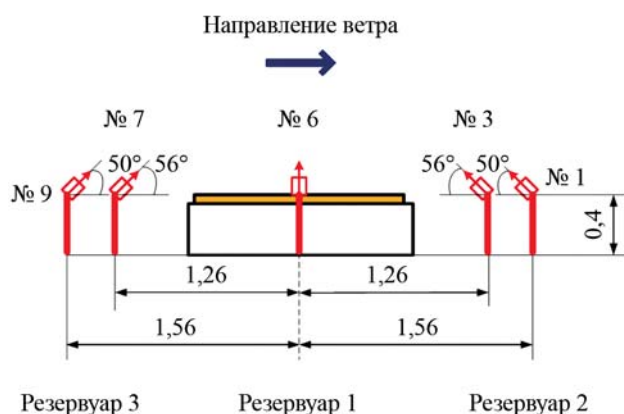


Рис. 6. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 1–3)

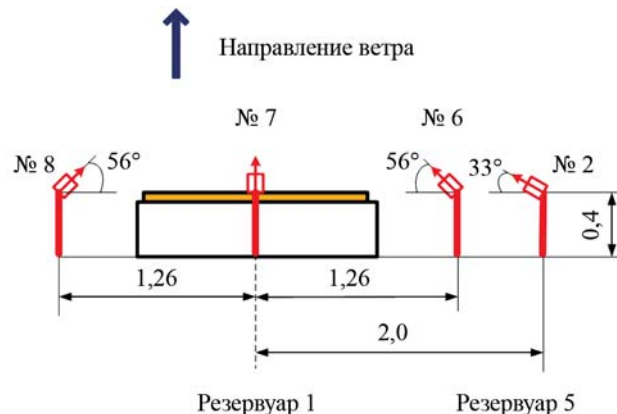


Рис. 7. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 1 и 5)

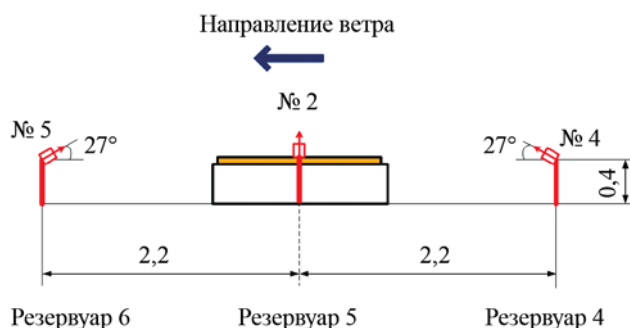


Рис. 8. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 4–6)

При использовании модельного эксперимента возникает проблема сравнения модели с реальным объектом, которая решается путем применения теории подобия. Теория подобия позволяет установить характеристики модели, параметры, которые целесообразно варьировать в экспериментах, правила переноса результатов на реальные объекты и ответить на иные вопросы, связанные с реализацией экспериментов.

В проведенном авторами исследовании применялся метод подобия. Необходимым и достаточным условием подобия модели и объекта является постоянство числовых значений безразмерных комплексов. В экспериментах модель объекта и вертикальный стальной резервуар с защитной стенкой объемом 125 тыс. м³ геометрически подобны, так как их одинаковые размеры пропорциональны и углы равны.

Поскольку в процессе исследования создавалась различная ветровая нагрузка, это требовало кинематического сходства реальной скорости ветра и скорости ветра в эксперименте. Работа [21] демонстрирует очень слабую зависимость коэффициента подобия k от критерия Рейнольдса

Re при $Re \gg 1000$, т.е. аэродинамические коэффициенты на моделях требуют выполнения только условия подобия по геометрической (линейной) шкале. При этом влияние степени турбулентности на расчетные значения обычно не принимается во внимание, поскольку измерения степени турбулентности в потоке воздуха и регулирования этой степени требуют сложного оборудования и специальных исследований. Таким образом, скорость на модели и скорость на реальном объекте кинематически подобны, поскольку при соблюдении геометрического подобия скорости подобных точек пропорциональны, их траектории аналогичны:

$$\frac{l_{1i}}{l_{2i}} = idem, \quad \frac{v_{1k}}{v_{2k}} = idem, \\ i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где l_{1i} , l_{2i} , l_{1k} , l_{2k} — характерные геометрические размеры и скорости.

Известно, что характер, форма и размеры пламени при прочих равных условиях определяются характеристиками горючей жидкости, ее температурой, размерами сосуда и ветровой нагрузкой. На ос-

новании геометрического подобия модели и реального объекта, кинематического подобия скоростей ветра и выбора одинакового вида горючей жидкости (бензина) можно сделать вывод, что в ходе экспериментов обеспечивается подобие пламенной зоны на физической модели и резервуаре объемом 125 тыс. м³. Кроме того, при выборе геометрических размеров модели авторами учитывалось требование обеспечения развития турбулентного режима горения, которое характерно для реального объекта.

Результаты и их обсуждение

После проведения экспериментов с использованием модели авторами получены значения теплового потока при пожаре бензина в основном резервуаре в зависимости от расстояния от резервуара до объекта и скорости ветра. На рис. 9 наглядно представлены данные от датчика № 1, зафиксированные в результате экспериментов № 1, 2, 10 и 11, на рис. 10 — данные от датчика № 1 при скорости ветра 1,9 м/с.

Для построения сети ANFIS, прогнозирующей тепловой поток (без ветровой нагрузки), отобрано четыре эксперимента без ветровой нагрузки: эксперименты № 1, 2, 10 и 11. В качестве входных па-

раметров сети использованы следующие: вход 1 — время, с; вход 2 — расстояние от центра резервуара, м; вход 3 — угол наклона от горизонтали вверх, град.; выходной параметр сети — тепловой поток, кВт/м².

С целью построения сети ANFIS для прогнозирования теплового потока (с ветровой нагрузкой) отобрано семь экспериментов с ветровой нагрузкой: эксперименты № 3–9. В качестве входных параметров сети использованы следующие: вход 1 — время, с; вход 2 — скорость ветра, м/с; вход 3 — расстояние от центра резервуара, м; вход 4 — угол наклона от горизонтали вверх, град.; выходной параметр сети — тепловой поток, кВт/м².

Общее количество экспериментальных данных для построения сети ANFIS, прогнозирующей тепловой поток без ветровой нагрузки, составило 10 845 записей: 50 % от общего набора — обучающая выборка, 50 % от общего набора — тестовая выборка. При построении сети ANFIS, определяющей прогноз теплового потока при ветровой нагрузке, использованы экспериментальные данные в количестве 32 518 записей. Из общего набора записей сформированы выборки для обучения и тестирования: 50 % от общего набора — обучающая выборка,

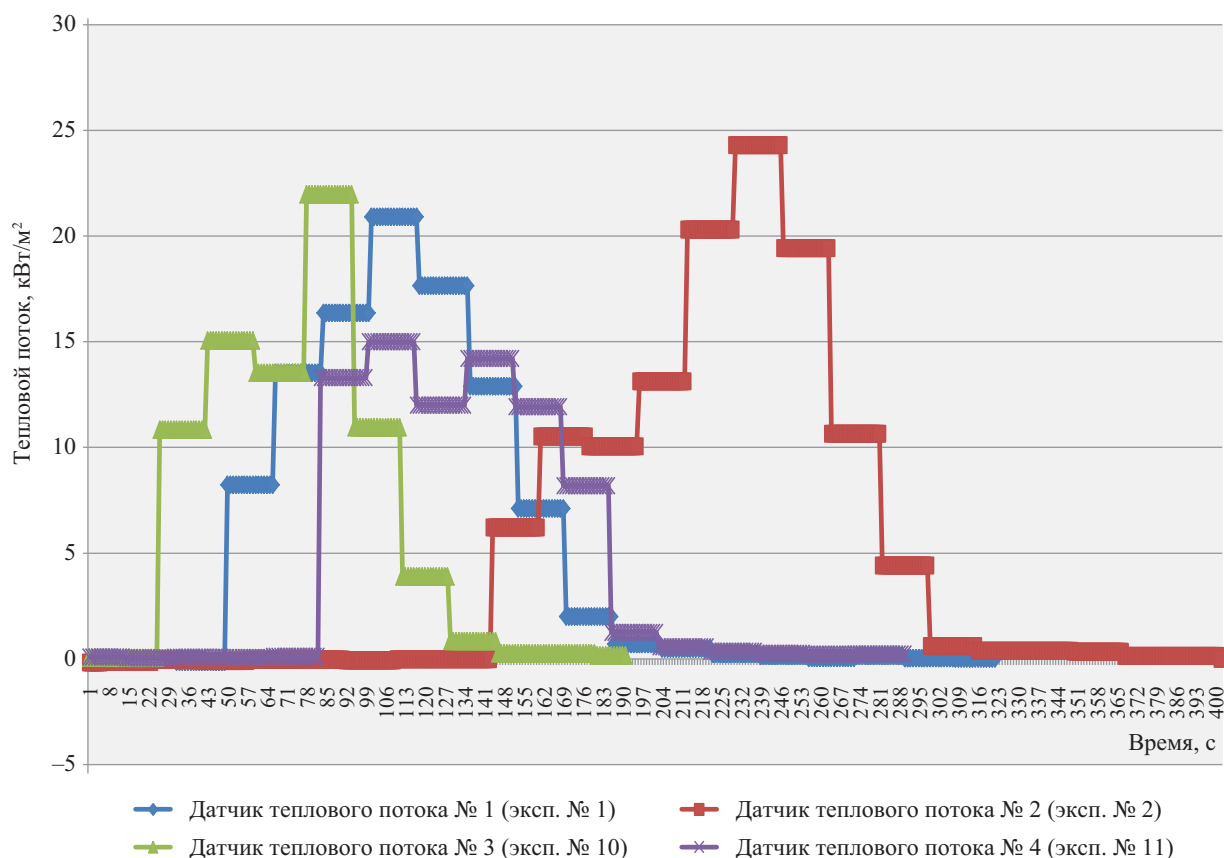


Рис. 9. Зависимость теплового потока от времени (датчик теплового потока № 1, скорость ветра — 0 м/с)

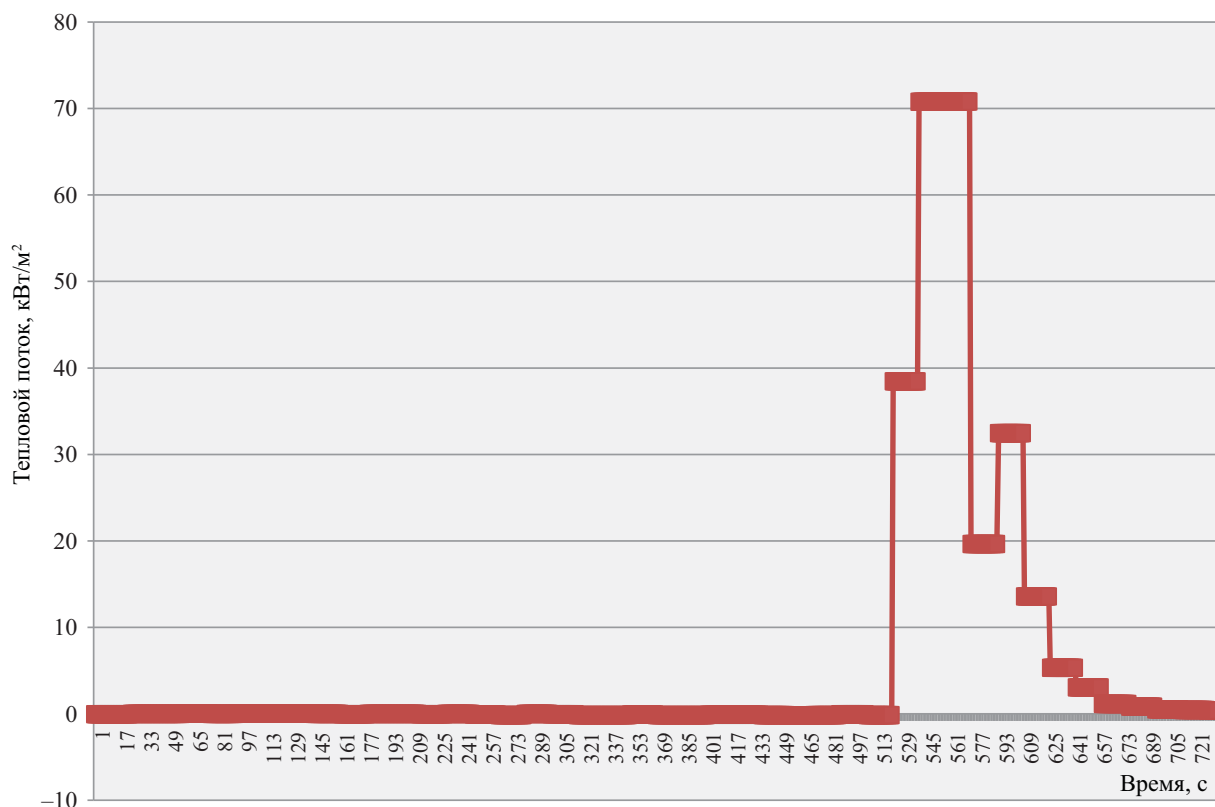


Рис. 10. Зависимость теплового потока от времени (датчик теплового потока № 1, скорость ветра — 1,9 м/с)

50 % от общего набора — тестовая выборка. Для формирования обучающей выборки (табл. 3 и 4) из общего набора записей в обоих случаях отобраны все записи с нечетными числами, для тестовой выборки (табл. 5 и 6) — с четными числами.

Выполнено сравнение типов функций принадлежности при различных методах оптимизации при генерировании системы по алгоритму решетчатого разбиения при следующих параметрах сети:

- количество обучающих эпох — 100;
- количество функций-членов для каждого входа — 3;

- погрешность — 0;
- метод оптимизации — гибридный или метод обратного распространения ошибки.

Как видно из полученных результатов (табл. 7), наименьшая ошибка RMSE для сети ANFIS без ветровой нагрузки соответствует использованию произведения двух сигмоидальных функций принадлежности. Для сети ANFIS, формирующей прогноз с учетом ветровой нагрузки, наименьшая ошибка RMSE, как видно из табл. 8, соответствует применению обобщенной колоколообразной функции принадлежности.

Таблица 3. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (без ветровой нагрузки)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Выход
1	1,00	1,56	50,00	0
2	3,00	1,56	50,00	0
3	5,00	1,56	50,00	0
4	7,00	1,56	50,00	0
5	9,00	1,56	50,00	0
...	...	...	...	...
5423	290,00	1,56	50,00	1

Таблица 4. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (с ветровой нагрузкой)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Выход
1	1,00	1,90	1,26	56,00	0
2	3,00	1,90	1,26	56,00	0
3	5,00	1,90	1,26	56,00	0
4	7,00	1,90	1,26	56,00	0
5	9,00	1,90	1,26	56,00	0
...	...	...	...	...	...
16 259	270,00	4,40	1,56	50,00	0

Таблица 5. Фрагмент тестовой выборки для ANSIS (без ветровой нагрузки)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Выход
1	2,00	1,56	50,00	0
2	4,00	1,56	50,00	0
3	6,00	1,56	50,00	0
4	8,00	1,56	50,00	0
5	10,00	1,56	50,00	0
...	...	...	...	...
5422	289,00	1,56	50,00	1

Таблица 6. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (с ветровой нагрузкой)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Выход
1	2,00	1,90	1,26	56,00	0
2	4,00	1,90	1,26	56,00	0
3	6,00	1,90	1,26	56,00	0
4	8,00	1,90	1,26	56,00	0
5	10,00	1,90	1,26	56,00	0
...	...	...	...	...	...
16 258	269,00	4,40	1,56	50,00	0

Таблица 7. Значения ошибки ANFIS (без ветровой нагрузки) в зависимости от типа функции принадлежности и метода оптимизации

Функция принадлежности	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод		
Треугольная	8,90	8,86
Трапецевидная	9,01	8,96
Обобщенная колоколообразная	8,92	8,87
Гауссова	8,89	8,84
Гауссова комбинационная	9,01	8,96
Пи-образная	9,05	9,00
Разность между двумя сигмоидальными функциями	8,78	8,73
Произведение двух сигмоидальных функций	8,72	8,67
Метод обратного распространения ошибки		
Треугольная	10,85	10,79
Трапецевидная	10,78	10,73
Обобщенная колоколообразная	10,85	10,79
Гауссова	10,85	10,79
Гауссова комбинационная	10,77	10,79
Пи-образная	10,76	10,70
Разность между двумя сигмоидальными функциями	10,78	10,72
Произведение двух сигмоидальных функций	10,74	10,68

Таблица 8. Значения ошибки ANFIS (с ветровой нагрузкой) в зависимости от типа функции принадлежности и метода оптимизации

Функция принадлежности	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод		
Треугольная	7,30	7,26
Трапецевидная	7,34	7,29
Обобщенная колоколообразная	7,07	7,02
Гауссова	7,16	7,12
Гауссова комбинационная	7,34	7,30
Пи-образная	7,36	7,31
Разность между двумя сигмоидальными функциями	7,31	7,27
Произведение двух сигмоидальных функций	7,31	7,27
Метод обратного распространения ошибки		
Треугольная	7,97	7,93
Трапецевидная	7,91	7,87
Обобщенная колоколообразная	7,97	7,92
Гауссова	7,97	7,93
Гауссова комбинационная	7,91	7,87
Пи-образная	7,91	7,86
Разность между двумя сигмоидальными функциями	7,91	7,86
Произведение двух сигмоидальных функций	7,91	7,86

Произведено сравнение полученных результатов с результатами при генерировании системы через субтрактивную кластеризацию по горному методу. При построении сетей ANFIS с использованием метода субкластеризации применены следующие параметры:

- вектор радиусов — 0,5;
- коэффициент подавления — 1,25;
- коэффициент принятия — 0,5;
- коэффициент отторжения — 0,15;
- количество обучающих эпох — 100.

Результаты, представленные в табл. 9 и 10, демонстрируют следующие выводы:

- сеть ANFIS для прогнозирования теплового потока без учета ветровой нагрузки, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный);
- сеть ANFIS для прогнозирования теплового потока с учетом ветровой нагрузки, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный).

Таблица 9. Значения ошибки ANFIS (без ветровой нагрузки) в зависимости от метода оптимизации на обучающей и тестовой выборках

Метод оптимизации	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод	8,33	8,28
Метод обратного распространения ошибки	42,53	42,42

Таблица 10. Значения ошибки ANFIS (с ветровой нагрузкой) в зависимости от метода оптимизации на обучающей и тестовой выборках

Метод оптимизации	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод	6,61	6,56
Метод обратного распространения ошибки	9,01	8,96

Таким образом, произведено сравнение различных типов функций принадлежности, методов оптимизации и методов генерирования системы и установлено, что для сетей ANFIS, выполняющих прогнозирование теплового потока без учета и с учетом ветровой нагрузки, оптимальным является применение метода субкластеризации и гибрид-

ного метода оптимизации, что обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках.

Разработанные сети ANFIS использованы для формирования системы правил с целью определения зависимости теплового потока в резервуарах с защитной стенкой от факторов внешней среды. Сети ANFIS предназначены для формирования прогностического сценария развития пожара в основном резервуаре для резервуара с защитной стенкой.

Результаты анализа показывают, что скорость ветра и расположение резервуара могут привести к повышению температуры воздуха, стенки резервуара и бензина. Поэтому, несмотря на сложность анализа, регистрация всех этих факторов позволяет прогнозировать безопасное расстояние от горящего резервуара для пожаротушения.

Существует разница между результатами исследований и экспериментальными данными. Причиной этого может быть то, что вспышки пожаров зависят от других факторов, помимо скорости ветра, расстояния и угла, которые не были включены в модель. Кроме того, во временном ряду может присутствовать шум, связанный с колебаниями незарегистрированных факторов.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: сеть ANFIS, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный).

Выводы

В исследовании авторами рассмотрен сценарий развития пожара в основном резервуаре внутри резервуара с защитной стенкой, входящего в состав резервуарного парка.

Процесс планирования и проведения полевых экспериментов подробно описан в представленной работе (см. рис. 3–9). В результате экспериментов произведен сбор экспериментальных данных (см. рис. 10 и 11) с использованием датчиков теплового потока SBG01.

На основании экспериментальных данных сформированы обучающие и тестовые выборки (см. табл. 3–6) и определены зависимости теплового потока от факторов внешней среды посредством построения искусственных нейронных сетей ANFIS.

Выполнено сравнение типов функций принадлежности для выбора оптимальной функции для обеих сетей ANFIS (без ветровой нагрузки и с ветровой нагрузкой). Установлено, что при гибридном методе оптимизации произведение двух сигмоидальных функций принадлежности является оптимальным типом функции принадлежности для сети ANFIS без ветровой нагрузки (RMSE = 8,72 для обучающей выборки, RMSE = 8,67 для тестовой выборки). Для сети ANFIS, учитывающей ветро-

вую нагрузку, при гибридном методе оптимизации обеспечиваются лучшие результаты применения обобщенной колоколообразной функции принадлежности ($RMSE = 7,07$ для обучающей выборки, $RMSE = 7,02$ для тестовой выборки).

Выполнен анализ сетей ANFIS, построенных с использованием метода субкластеризации. Установлено, что для прогнозирования теплового потока с использованием сети ANFIS как без учета, так и с учетом ветровой нагрузки метод субкластеризации (при гибридном методе оптимизации) обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках. Так, для сети ANFIS без учета ветровой нагрузки $RMSE = 8,33$ для обучающей выборки, $RMSE = 8,28$ для тестовой выборки, а для сети ANFIS с учетом ветровой нагрузки $RMSE = 6,61$ для обучающей выборки, $RMSE = 6,56$ для тестовой выборки.

Научное исследование позволило разработать модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе использования элементов искусственного интеллекта (сетей ANFIS). В представленном исследовании авторы особое внимание уделили выявлению зависимости теплового потока от ветровой нагрузки. Полученные в ходе работы результаты позволят повысить эффективность локализации и ликвидации пожаров, безопасность пожарных объектов и персонала, сократить социальный, экономический и экологический ущерб. Модель оперативного прогнозирования теплового потока, учитывающая влияние факторов окружающей среды, в том числе и ветровой нагрузки, может применяться в системах поддержки принятия управленческих решений для принятия управленческих решений по размещению персонала и оборудования в современных резервуарных парках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю., Мухин И.А. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. // Нефтегазовое дело. 2017. № 6. С. 179–191. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784379>
2. Демёхин Ф.В., Таранцев А.А., Белов Д.И. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2013. № 2. С. 68–75. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V52/13.pdf>
3. Петрова Н.В., Чешко И.Д., Галишев М.А. Анализ практики экспертного исследования пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 3. С. 40–46. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/7.pdf>
4. Блинов В.И., Худяков Г.Н., Петров И.И. О механизме тушения горения нефтепродуктов в резервуарах путем перемешивания их воздухом. М. : Информационный сборник ЦНИИПО, 1958. С. 34–38.
5. Петров И.И., Реутт В.Ч. Критические условия потухания пламени нефтепродукта при его перемешивании в резервуаре. М. : Информационный сборник ЦНИИПО, 1959. С. 58–61.
6. Волков О.М., Проскуряков Г.А. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. М. : Недра, 1981. 256 с.
7. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Минимизация ущерба при пожаре в резервуарных парках // Пожаровзрывобезопасность. 2007. № 4. С. 59–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512034>
8. Zabetakis M.G., Burgess D.S. Research on hazards associated with production and handling of liquid hydrogen. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1961. DOI:10.2172/5206437
9. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission. Part 1: Slot-burner flames, comparison with jet flames // Symposium (International) on Combustion. 1991. Vol. 23. No. 1. Pp. 1685–1692. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80443-1
10. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission — Part 2: Radiation and heat transfer from porous-metal wall burner flames // Symposium (International) on Combustion. 1992. Vol. 24. No. 1. Pp. 1747–1752. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80204-3
11. Drysdale D. An introduction to fire dynamic. John Wiley & Sons, 2011. 512 p.
12. Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates // Fire Technology. 1983. Vol. 19. No. 4. Pp. 251–261. DOI: 10.1007/BF02380810
13. Munoz M., Arnaldos J., Casal J., Planas E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires // Combustion and Flame. 2004. Vol. 139. No. 3. Pp. 263–277. DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.09.001

14. Швырков С.А., Воробьев В.В., Ибатуллин Р.К. Опасность каскадного развития пожара в резервуарном парке при ветровом воздействии // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 4 (74). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/26-04-17.ttb.pdf>
15. Рубцов Д.Н., Шалымов М.С. О развитии пожара в резервуаре типа «стакан в стакане» с нефтью и нефтепродуктами // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 3 (67). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/23-03-16.ttb.pdf>
16. Schälike S., Mishra K.B., Malow M., Berger A., Wehrstedt K.D., Schönbucher A. Mass burning rate of a large TBPB pool fire – experimental study and modeling // Chemical Engineering Transactions. 2013. Vol. 31. Pp. 853–858. DOI: 10.3303/CET1331143
17. Шалымов М.С. Влияние тепловых нагрузок пожара в нефтяном резервуаре на соседние резервуары // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 2 (60). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/16-02-15.ttb.pdf>
18. Anwar Z., Afzal H., Bibi N., Abbas H., Mohsin A., Arif O. A hybrid-adaptive neuro-fuzzy inference system for multi-objective regression test suites optimization // Neural Computing and Applications. 2019. Vol. 31. No. 11. Pp. 7287–7301. DOI: 10.1007/s00521-018-3560-8
19. Зайченко Ю.П., Севаев Ф. Исследование эффективности нечеткой нейронной сети ANFIS в задачах макроэкономического прогнозирования // Системні дослідження та інформаційні технології. 2005. № 1. С. 100–112. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13765>
20. Leite R.M., Centenob F.R. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 342. Pp. 544–552. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.052
21. Yun-Wei Zhanga, Zhao-Lin Gua, Zan-She Wanga, Chuck Wah Francis Yua. Revisit of wind flows between wind tunnels and real canyons – the viewpoint of Reynolds dynamic similarity // Indoor Built Environ 2013. Vol. 22. No. 3. Pp. 467–470. DOI: 10.1177/1420326X12489064

Поступила 29.07.2020, после доработки 05.08.2020;
принята к публикации 18.08.2020.

Информация об авторах

СТАНКЕВИЧ Татьяна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Калининградский государственный технический университет (КГТУ), г. Калининград, Российская Федерация; магистрант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 717673; ResearcherID: O-7418-2017; Scopus Author ID: 57214781783; ORCID: 0000-0002-8707-7187; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

ДАЛНЕР Далибор, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 57194767595; ORCID: 0000-0003-4071-1918; e-mail: dalibor.balner@vsb.cz

ТРЧКА Мартин, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 56330779100; ORCID: 000-0002-4574-229X; e-mail: martin.trcka@vsb.cz

ТОМИТЧЕК Адам, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 56331461400; ORCID: 0000-0002-6697-8787; e-mail: adam.thomitzek@vsb.cz

Prompt forecasting of heat flows under fire conditions in a vertical steel tank having an ANFIS protective wall

© Tatiana S. Stankevich^{1, 2} ✉, Dalibor Balner³, Martin Trcka³, Adam Thomitzek³

¹ Kaliningrad State Technical University (Sovetskiy Avenue, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation)

² National Research University Higher School of Economics (Myasnikitskaya St., 20, Moscow, 101000, Russian Federation)

³ VSB – Technical University of Ostrava (17.Listopadu 2172/15, Ostrava-Poruba, 708 00, Czech Republic)

ABSTRACT

Introduction. Tanks and tank farms are widespread in many constituent entities of the Russian Federation and are among the most important elements of the model for the production, treatment, transportation and processing of oil and oil products. It is relevant both at the Russian and global levels to ensure that fire safety is arranged for tank farms to reduce highest risk levels according to the risk-based safety model. In the context of information and communication technology (ICT) developments and introduction of ICT into the operation and management of various facilities, over the past decades advanced methods have emerged for predicting the occurrence and development of emergency situations at facilities and enhancing management decisions on containment and elimination of emergency situations including fires.

Goals and objectives. In this paper, the authors present a model that they developed to promptly forecast heat flows using artificial neural networks. The forecast model will improve the safety of fire brigade personnel responsible for extinguishing fires inside ground-based vertical steel tanks having protective walls. In the research, the authors place special emphasis on identifying dependence between the heat flow and the wind load.

Methods. To achieve this goal, the authors arranged and conducted a series of experiments, collected experimental data on heat flows, and created training and test samples.

Results. Dependences between heat flows and environmental factors were identified by constructing adaptive neuro-fuzzy inference systems or adaptive network-based fuzzy inference systems (ANFIS). Various types of membership functions, optimisation and system generation methods were compared and it was found out that for ANFISs, prediction of heat flows with regard to and disregarding wind loads were optimal, if subcluster and hybrid optimisation methods were used, as they had lowest error values for samples.

Discussion. The analysis shows that wind speed and tank location can rise temperatures of the air, tank wall and petrol. Therefore, despite the complexity of the analysis, the regard for all these factors makes it possible to identify a safe distance between a burning tank and firefighters.

Conclusions. The research made it possible to develop a model for prompt heat flow forecasting with the help of artificial intelligence elements (ANFIS). The results obtained in the course of the work make it possible to increase the efficiency of prompt forecasting of the dynamic behaviour of fire inside tanks and tank farms and optimize managerial decision-making by responsible persons.

Keywords: fire safety; petrol; physical model; wind load; artificial neural networks

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the research project Development of a Fire Model for Risk Assessment at Highly Dangerous and Technically Challenging Objects, Ostrava Technical University, Czech Republic, 2018-2019

For citation: Stankevich T.S., Balner D., Trcka M., Thomitzek A. Prompt forecasting of heat flows under fire conditions in a vertical steel tank having an ANFIS protective wall. *Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):13-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39

✉ Tatiana Sergeevna Stankevich, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Introduction

Recently, a particular focus has been placed by the global community on ensuring human security and sustainable development of mankind in interaction with the environment. A global problem of concern throughout the world is the growing fire hazard from the facilities that are of strategic importance for the national security, namely the national fuel and energy sector.

The relevance of fire safety at the facilities of the fuel and energy sector originates from the fact that

power engineering is the main industry in any state. In addition, power engineering is of decisive cross-sectoral importance, since the level and quality of mining, producing and supplying energy resources determine the conditions for national production activities and services.

Currently, in Russia, as stated by the Unified Inter-departmental Statistical Information System (EMISS)¹,

¹ EMISS. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/>

there are 8,139 tanks for oil products with a total capacity of 16,512,170 m³ and 772 tanks for crude oil with a total capacity of 5,590,580 m³. According to the final reports of the Russian Ministry of Energy for 2018² and 2019³, 54 fields were commissioned in the Russian oil industry in 2018, 31 fields in 2019; and in 2018, the total length of new oil pipelines reached 216 km, in 2019 — 324 km. Growing oil refining for domestic use and export is accompanied by the construction of large oil depots having big tanks in the country. Tank farms having tanks with the capacity of up to 50,000 m³ are being intensively built in the Russian Federation; at the same time, tanks having the capacity of up to 100,000 m³ are being designed.

An increase in oil production and intensive development of oil production and oil refining industries in Russia boost the number of fires, thus, leading to the growth of the fire scale and the damage caused. From 2007 to 2016, as indicated in [1], 126 emergencies occurred. The dynamics of various emergency situations (fire, explosion or emission) is shown in Fig. 1. Over a ten-year period, there have been 65 fires, 46 explosions and 15 emissions of hazardous substances, which is 52, 36 and 12 % of the total number of incidents, respectively (Fig. 2). 93.4 % of fires and accidents at oil depots were recorded at ground storage tanks, of which 53.9 % were at petrol storage tanks; 32.1 % at crude oil storage tanks; 14.0 % at tanks used for storing other oil products (diesel fuel, kerosene, fuel oil. etc.).

According to [2], risks of various accidents, involving tanks, are quite high in Russia. For example, the risk of fire in pressure vent valves and oil level is

$9.0 - 10^{-5} \text{ year}^{-1}$, which is 90 times higher than the recommended level of 10^{-6} specified in GOST 12.1.004-91⁴.

Despite the fact that the statistics on accidents at the facilities of the oil refining and petrochemical industries show a decrease in the frequency of fires and in the number of people injured in fires, the numbers are disappointing and exceed those in Europe presented in the Major Accident Reporting System (eMARS)⁵, and in the USA according to the National Fire Protection Association data⁶.

The outbreak of fires in oil and oil product storage facilities and their spread pose a significant threat to life and health of citizens, and also has a negative impact on the environment (which is almost irretrievable). Fires at facilities of the fuel and energy sector can be characterised by a vast combustion spread area, powerful thermal radiation, while the height of the glowing flame is 1-2 times bigger than the diameter of a burning tank [3]. A fire spreads at high speed; burning is accompanied by explosions and emissions of burning liquid. Fires in tanks are long lasting; and they may last from several hours to several days and require a large amount of manpower and resources to be completely extinguished [3]. Fires are especially hazardous at oil depots and oil storage facilities, since heating of neighbouring tanks can cause a cascade fire.

Indeed, the increase in the number of fires and explosions inside tanks and at tank farms is a relevant problem. The research in this area can ensure higher security for the population and the environment from man-made threats and technology-related risks. For the purpose of research, tank farms designated for storing petrol were selected, since they can accumu-

² Operating performance of the Russian Ministry of Energy in 2019 and key challenges for 2020. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/18288>

³ Operating performance of the Russian Ministry of Energy and key results of the fuel-and-power sector operations in 2018. Mid-term objectives. URL: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf

⁴ GOST 12.1.004-91. Occupational safety standards system (SSBT). Fire safety. General requirements. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

⁵ eMARS. URL: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>

⁶ National Fire Protection Association. U.S. fire problem. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/US-Fire-Problem>

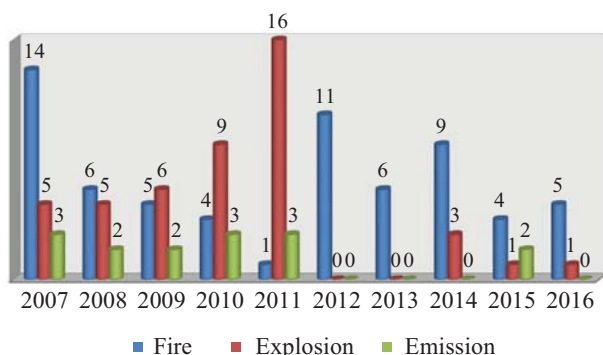


Fig. 1. Number of emergencies at the facilities of oil and oil refining industries in Russia from 2007 to 2016

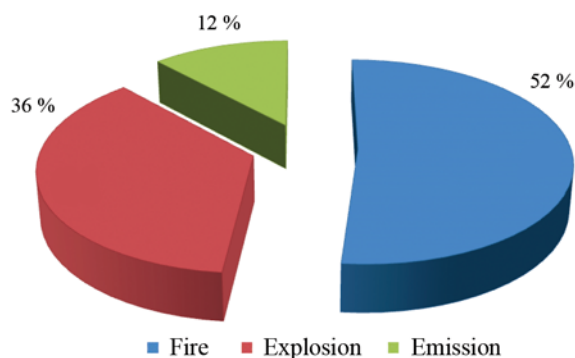


Fig. 2. Breakdown of emergency situations at oil production and refining facilities in Russia from 2007 to 2016

late the largest amount of flammable liquid, and there is a high probability of fire spread to adjacent tanks. The type of fuel (petrol) is chosen due to the reviewed statistical data on fires at oil and oil product storage facilities (over 50 % of emergency situations occur inside above-ground petrol storage tanks).

This research is focused on a farm having vertical steel tanks with a protective wall. This type of storage units represents a new trend in building oil and oil product storage facilities and expanding the existing ones.

The research is aimed at improving the safety of firefighting personnel when extinguishing a fire inside a ground-based vertical steel tank with a protective wall by using artificial neural networks to simulate the fire (heat flow) spread pattern.

Materials and methods

A rigorous research into liquid combustion processes is conducted by Russian and foreign scientists, including the work co-authored by V.I. Blinova, G.M. Khudyakov and I.I. Petrov [4], in which the authors carried out comprehensive studies of extinguishing patterns applicable to oil and oil product combustion processes and substances. A joint research by I.I. Petrov and V.Ch. Reutt [5] was a natural follow-up to this work; in this project, special focus was placed on identification of critical conditions for flame extinction in a tank, in case that an oil product is stirred there. Fire safety issues inside tank farms were studied by O.M. Volkov and G.A. Proskuryakov [6]. They analyzed the origin and development of fires at facilities as well as key measures to prevent and extinguish fires involving oil and oil products. Yu.A. Abramov and A.E. Basmanov in [7] considered deterministic and stochastic models of setting the optimal location and choosing combat missions for fire-fighters containing fire at tank farms. They proposed a method and an algorithm for solving the problem in deterministic and stochastic forms. In the study [8] M.G. Zabetakis and D.S. Burgess considered the evaporation of liquid hydrogen from the point of view of the theory of heat transfer and experimentally identified the pattern of distribution of flammable mixtures over the spill area. During the experiments, ignition of hydrogen vapour above the Dewar vessel and ignition of the vapour-air mixture above the spill area were carried out at different times after the spill of various amounts (up to 90 litres) of liquid hydrogen. G.H. Markstein [9, 10] described the results of experiments on measuring the total radiation emitted by the burning flame of a slot burner and a jet flame (fuel — methane, ethane, ethylene and propylene), measured radiant heat transfer and heat transfer caused by the combustion of methane, ethane, ethylene and propylene on the vertical surface of porous metal.

The shape of the flame and the heat flow were described by D. Drysdale in his works [11]. There are also some experimental researches related to fires in fuel storage tanks or in pools. For example, V. Babrauskas' work [12] contains experimental data on combustion rates of petrol, liquefied natural gas and alcohol for pools having a diameter of 0.2 to 7.0 m. M. Munoz in [13] took thermographic measurements of fires in 1.5 to 6.0 m diameter pools containing petrol and diesel fuel. In [14], experiments on fire extinguishing in pools (3.0 m in diameter) are described and mass combustion rates are measured. Fire development inside the tanks of the 'glass in a glass' type are described in works [15, 16]. The influence of the thermal load of a fire inside an oil tank on nearest tanks is presented in the article [17].

Based on the analysis of reference sources, it can be concluded that experiments are basically carried out without taking into account the effect of the wind load (at a wind speed of 0 m/s), in the works, most researchers either do not take into account the effect of wind on the heat flow during the fire, or use simplified ratios.

Since the processes of combustion, thermal radiation of the flame and its scattering in the atmosphere differ due to their complex mutual influence, it is necessary to carefully study the fire development process in a tank under different wind loads in order to choose tank protection measures and develop recommendations on how to carry out fire extinguishing actions.

The recent breakthrough in the development of artificial intelligence, big data and machine learning has created unprecedented opportunities for transition to advanced intelligent systems that process a large amount of information of various nature and generate management decisions in non-standard environments and hardly projected critical support situations to ensure the security of facilities. However, such tools are actively used in practice in marketing, social networks and business operations, while these methods are used to a limited extent in medicine and production activities.

In this work, the authors proposed to use artificial intelligence elements (artificial neural networks) to process data from an experiment on simulating a fire in a tank in the territory of a tank farm, which corresponds to the priorities and prospects of Russia's research and technology advancement according to the Scientific and Technological Development Strategy of the Russian Federation (Strategy of the RF STDS).

The research used an adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) [18] to predict the fire development pattern in the main tank. The choice of the ANFIS network is substantiated by the fact that this type of networks provides a lower root-mean-square error (RMSE) in comparison with other neuro-fuzzy systems. In addition, ANFIS networks are very effective in forecasting [19].

Architecturally, ANFIS is a five-layer network with nodes, each of which has dedicated features. The function of the node of each input is determined by the formula (1) [18]:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(P_j), \quad (1)$$

where P_j — input data for node i ;

A_i — membership function.

For the generalised bell-shaped function, formula (2) is used⁷:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{P_j - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad (2)$$

where a_i is the membership function concentration coefficient;

b_i is the coefficient of steepness of the membership function;

c_i is a coordinate of the membership function maximum.

For the Gaussian function, formula (3)⁸ is applied:

$$\mu_A(P_j) = e^{-\frac{(P_j - b_i)^2}{2c_i^2}}, \quad (3)$$

where b_i is the coordinate of the membership function maximum;

c_i is the coefficient of the membership function concentration.

For the Gaussian combined function formulas (4)–(5)⁹ apply:

$c_{1,i} < c_{2,i}$, then

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (4)$$

$c_{1,i} > c_{2,i}$, then

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (5)$$

where $c_{1,i}$ ($c_{2,i}$) is the minimum (maximum) value of the fuzzy set kernel;

$a_{1,i}$ ($a_{2,i}$) is the concentration coefficient of the left (right) part of the membership function.

For a triangular function, the calculation is made according to formula (6)¹⁰:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ \frac{c_i - P_j}{c_i - b_i}, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ 0, & c_i \leq P_j, \end{cases} \quad (6)$$

where $[a_i, c_i]$ is the variable range;

b_i is the most likely value of the variable.

For the trapezoidal function the following formula (7)¹¹ is used:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ \frac{d_i - P_j}{d_i - c_i}, & c_i \leq P_j \leq d_i, \\ 0, & d_i \leq P_j, \end{cases} \quad (7)$$

where $[a_i, d_i]$ is a pessimistic assessment of variable values;
 $[b_i, c_i]$ is an optimistic assessment of the variable values.

For the difference between two sigmoidal membership functions, the following formula is used (8)¹²:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} - \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (8)$$

For the pi-shaped membership function, the following formula (9)¹³ is applied:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i \\ 2 \left(\frac{P_j - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, & a_i \leq P_j \leq \frac{a_i + b_i}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - b_i}{b_i - a_i} \right)^2, & \frac{a_i + b_i}{2} \leq P_j \leq b_i \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - c_i}{d_i - c_i} \right)^2, & c_i \leq P_j \leq \frac{c_i + d_i}{2} \\ 2 \left(\frac{P_j - d_i}{d_i - c_i} \right)^2, & \frac{c_i + d_i}{2} \leq P_j \leq d_i \\ 0, & P_j \geq d_i \end{cases} \quad (9)$$

¹⁰ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trimf.html>

¹¹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trapmf.html>

¹² MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/dsimgmf.html>

¹³ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/pimf.html>

The product of two sigmoidal membership functions is calculated according to formula (10)¹⁴

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,j}(P_j - c_{1,j})}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_{2,j}(P_j - c_{2,j})}}. \quad (10)$$

To study the effect of heat flow on the main and protective walls of an item on fire and neighbouring tanks under various wind loads, within the research into a tank that has a protective wall, a fire caused by the combustion of petrol in the main tank was simulated.

The authors carried out an experiment on a simulated real item, or a tank having a volume of 125,000 m³. The geometric dimensions of the simulation are presented in Tabl. 1; Fig. 3 illustrates a diagram of the simulation; Fig. 4 shows photographs of the simulation. The total liquid volume (fuel + water ballast) corresponds to 80 % of the tank capacity. The choice of this capacity is explained by the fact that tanks are usually 80 % full. The steel grade used in the simulation is S590; it corresponds to the steel grade of a real 125,000 m³ tank having a protective wall.

The amount of consumed fuel was 0.499 m³ for each experiment and tank diameter. As it was pointed out in [20], the presence of water below the fuel can

affect combustion and boiling characteristics (sudden vaporisation of water), which depend on the type of fuel and amount of fuel above the water. However, this phenomenon was not registered during the experiments.

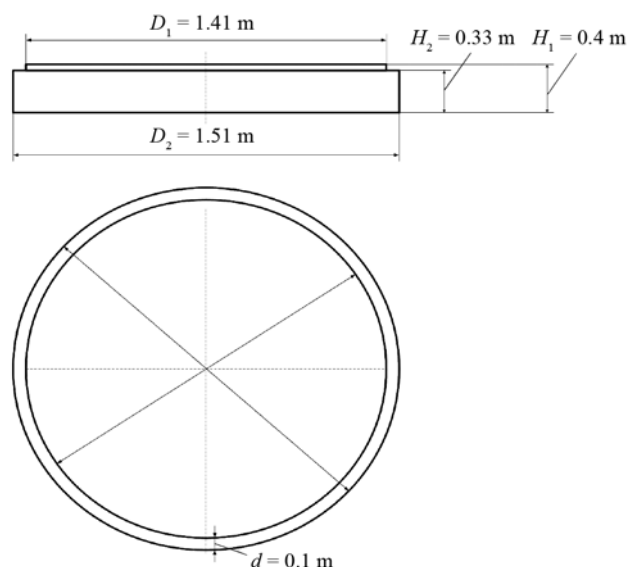


Fig. 3. Diagram (side view and top view) of a physical model: D_1 — diameter of the main tank, m; D_2 — diameter of the protective tank, m; d — width of the inter-wall space, m; H_1 — height of the main tank, m; H_2 — height of the protective tank, m



Fig. 4. Model of a tank having a protective wall

¹⁴ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/psigmf.html>

Table 1. Geometric parameters of the physical model

Parameter	Real object	Physical model
Protective tank diameter, m	90.47	1.51
Main tank diameter, m	84.47	1.41
Protective tank height, m	20.00	0.33
Main tank height, m	24.10	0.40
Tank wall and bottom thickness, m	0.06...0.26	0.002

The ambient temperature during the experiments was 0 °C, the atmospheric pressure was 1 atm. Since the tank was open (it had no lid), these experiments are similar to pool fires.

When simulating a fire, the authors selected the wind values most typical for July (July is the most unsafe period for oil and oil product storages). It is taken into account that, as indicated in [15], maximum wind speed during numerical simulation should not exceed 10 m/s, since the angle of deflection of the flame from the vertical under the influence of the wind and the flame length no longer change significantly with a further increase in the wind speed. Experiments involving a physical model were carried out indoors at various wind loads: Experiments 1, 2, 10 and 11 — without wind load; Experiment 3 — wind speed

1.9 m/s; Experiments 4 and 5 — 1.3 m/s; Experiments 6 and 7 — 0.9 m/s; Experiment 8 — 4 m/s; Experiment 9 — 4.4 m/s.

During the experiments, heat flow sensors were used, the characteristics of which are presented in more detail in Tabl. 2. Heat flow sensors SBG01 are located as shown in Fig. 5–8. More detailed information about the sensors is available in user manuals¹⁵.

In a simulation experiment, there arises a problem of comparing simulation with a real object, which is solved by applying the theory of similarity. The similarity theory makes it possible to set simulation characteristics and parameters that are worth varying in experiments, the rules used to transfer results to real objects, and answer other questions relating to the experiment implementation.

In the research carried out by the authors, the similarity method was used. A necessary and sufficient condition of similarity between a simulation model and a simulated object is the consistency of numerical values of dimensionless items. In the experiments, a simulation model of the object and a vertical steel tank with a protective wall having a volume of 125,000 m³ are geometrically similar, since their equal dimensions are proportional and angles are equal.

¹⁵ User manual SBG01. Water cooled heat flux sensor. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SBG01_manual_v1722.pdf

Table 2. Heat flow sensors

Experiment number	Sensor measuring range, kW/m ²	Distance from the centre of the tank to the sensor, m	Angle of inclination of the sensor from the contour line directed upwards, degrees	Sensor height from the ground, m
1	0...100	1.56	50	0.4
2	0...100	2.00	33	0.4
3	0...200	1.26	56	0.4
4	0...50	2.80	27	0.4
5	0...50	2.80	27	0.4
6	0...100	1.26	56	0.4
7	0...100	1.26	56	0.4
8	0...100	1.26	56	0.4
9	0...100	1.56	50	0.4
10	0...100	1.56	50	0.4
11	0...100	1.56	50	0.4

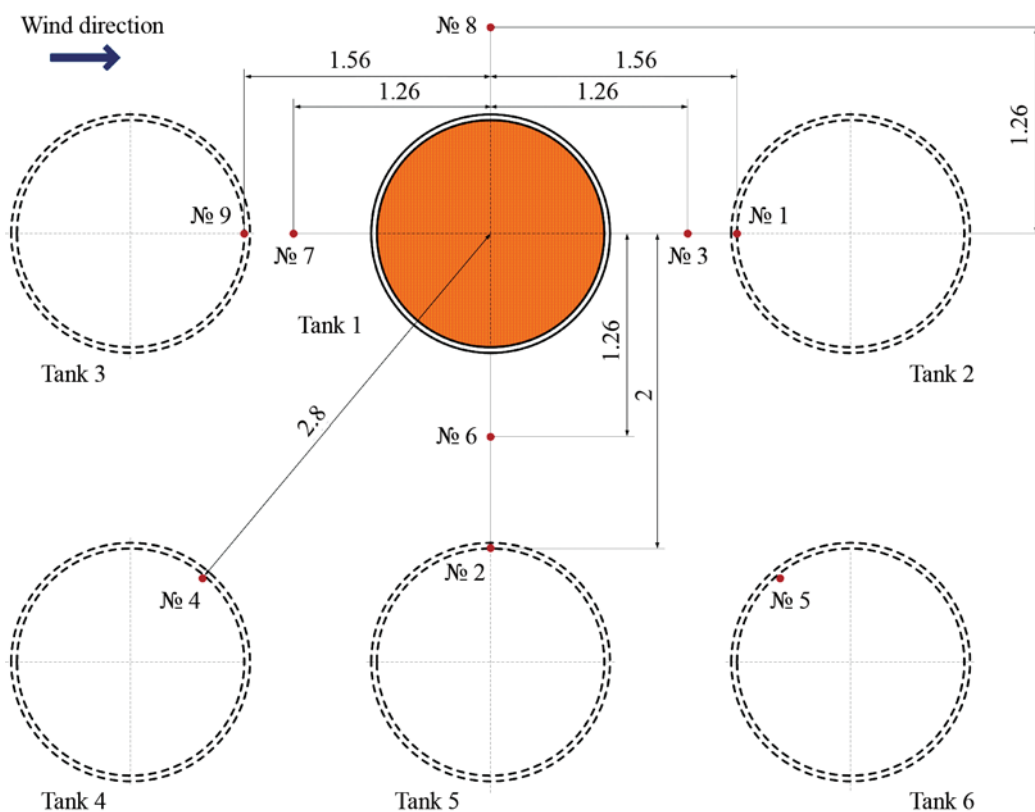


Fig. 5. Heat flow sensors (top view)

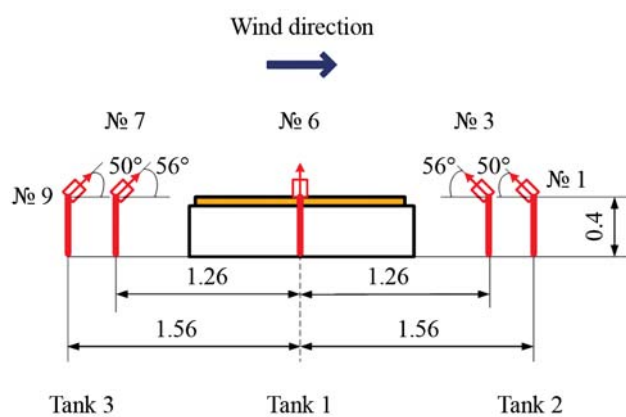


Fig. 6. Heat flow sensors (side view for Tanks 1-3)

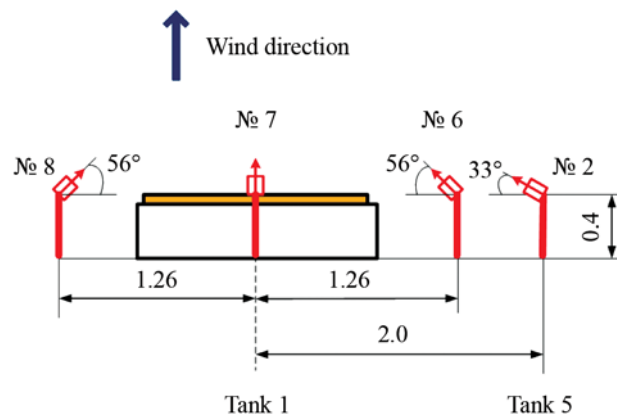


Fig. 7. Heat flow sensors (side view for Tanks 1 and 5)

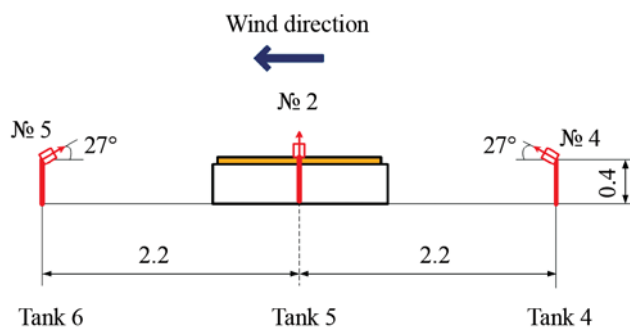


Fig. 8. Heat flow sensors (side view for tanks 4-6)

Since different wind loads were applied during the research, this experiment required kinematic similarity between the real wind speed and the wind speed in the experiment. The study [21] demonstrates a very low dependence of similarity coefficient k on Reynolds criterion Re at $Re \gg 1,000$, i.e. aerodynamic coefficients of models only require the fulfilment of the geometric (linear) similarity condition. In this case, the influence of the turbulence intensity on calculated values is usually not taken into account, since measuring the turbulence in the air flow and regulating this figure require some sophisticated equipment and special studies. Indeed, the speed in a simulation model and the speed in a real object are kinematically similar, since, subject to their geometric similarity, speeds are proportional, and their trajectories are similar:

$$\frac{l_{1i}}{l_{2i}} = idem, \frac{v_{1k}}{v_{2k}} = idem, \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m,$$

where l_{1i} , l_{2i} , l_{1k} , l_{2k} , are typical geometric dimensions and velocities.

It is understood that the nature, shape and size of flame, other things being equal, are determined by the characteristics of the flammable liquid, its temperature, the tank size and wind load. Based on

the geometric similarity of the simulation model and the real object, the kinematic similarity of wind speeds and the choice of the same type of combustible liquid (petrol), it can be concluded that the experiments ensure similarity of the burning area of a physical simulation model and a tank having a volume of 125,000 m³.

Results and discussion

Having conducted experiments involving the simulation model, the authors obtained values of heat flows emitted during petrol combustion in the main tank depending on the tank-to-object distance and the wind speed. Fig. 9 shows the data from Sensor 1 recorded as a result of experiments 1, 2, 10 and 11; Fig. 10 shows the data from Sensor 1 at the wind speed of 1.9 m/s.

To build an ANFIS network that will make heat flow projections (disregarding wind loads), four wind load-free experiments were selected; they were experiments 1, 2, 10 and 11. The following network input parameters were used: Input 1 — time, s; Input 2 — distance from the centre of the tank, m; Input 3 — angle of deviation from the horizontal, degrees; network output parameter — heat flow, kW/m².

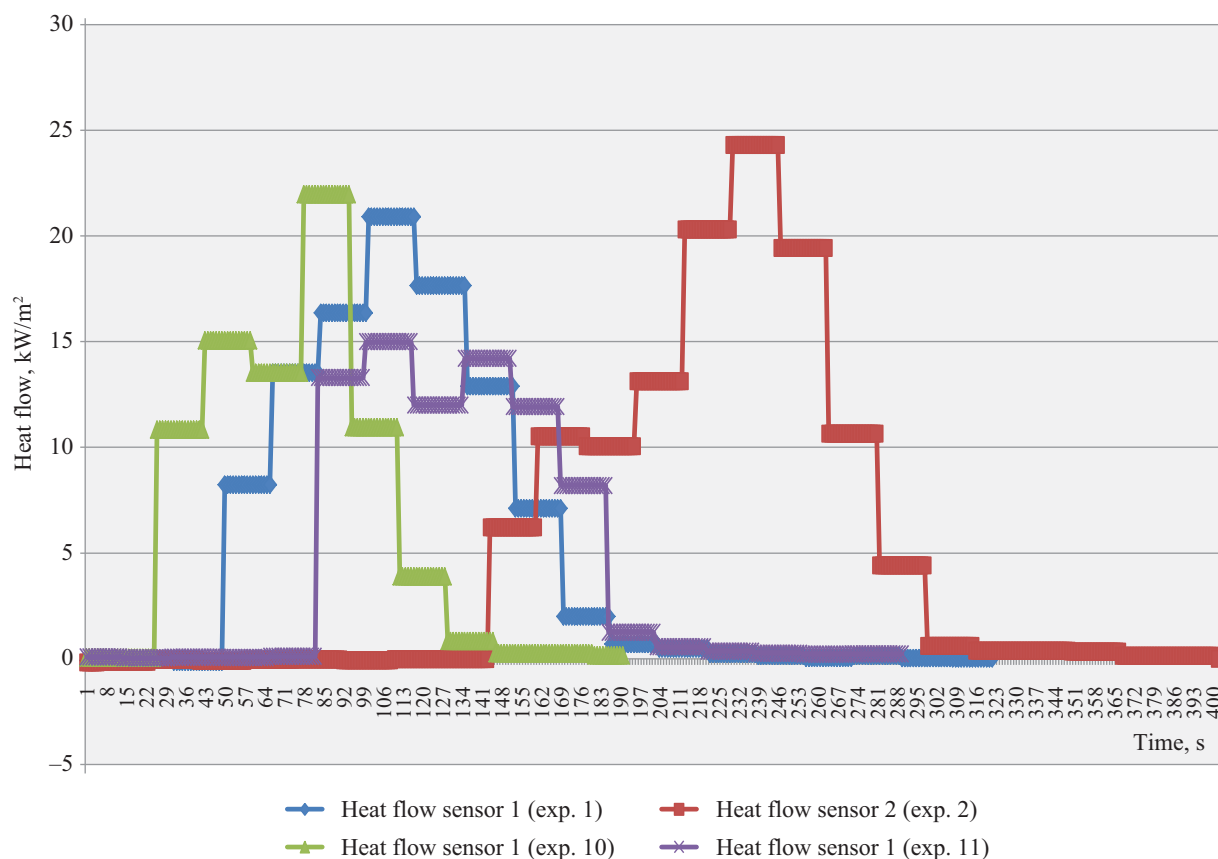


Fig. 9. Dependence of heat flow on time (heat flow sensor 1, wind speed — 0 m/s)

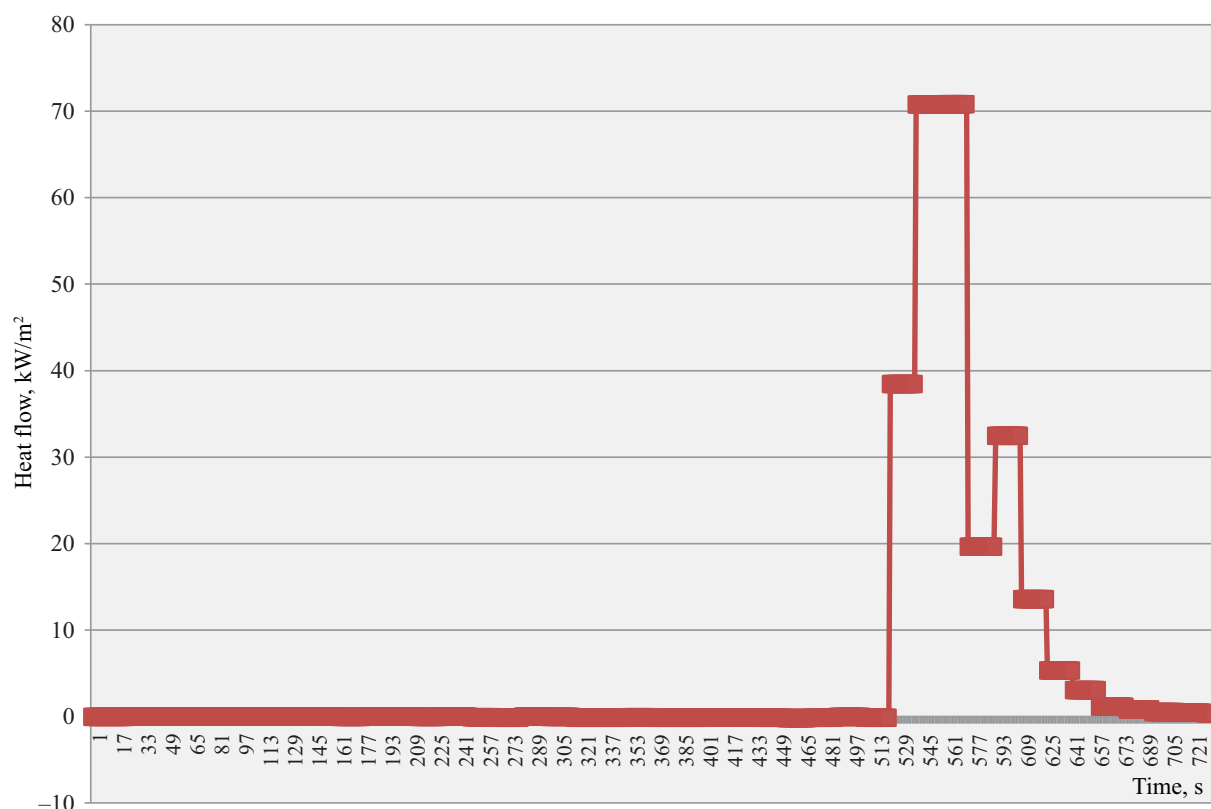


Fig. 10. Dependence of heat flow on time (heat flow sensor 1, wind speed — 1.9 m/s)

In order to build an ANFIS network will make heat flow projections (with regard for wind loads), seven experiments that took account of wind load were selected; they were experiments 3 to 9. The following network input parameters were used: Input 1 — time, s; Input 2 — wind speed, m/s; Input 3 — distance from the centre of the tank, m; Input 4 — angle of deviation from the contour line, degrees; network output parameter — heat flow, kW/m².

The total amount of experimental data applied to construct an ANFIS network capable of predicting heat flows disregarding the wind load comprised 10,845 records: 50 % of the total package were used

to produce the training sample, 50 % of the total package were applied to make the test sample. Experimental data that represented 32,518 records were used to make an ANFIS network capable of projecting heat flows with regard to the wind load. Training and testing samples were generated: 50 % of the total package were designated for training purposes, 50 % of the total package were test samples. All records having odd numbers were selected from the package of records to make a training sample (Tabl. 3 and 4), and records having even numbers were chosen for the test sample (Tabl. 5 and 6).

Table 3. Fragment of the training package for ANSIS (no wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Output
1	1.00	1.56	50.00	0
2	3.00	1.56	50.00	0
3	5.00	1.56	50.00	0
4	7.00	1.56	50.00	0
5	9.00	1.56	50.00	0
...	...	...	...	...
5423	290.00	1.56	50.00	1

Table 4. Fragment of the training package for ANSIS (wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
1	1.00	1.90	1.26	56.00	0
2	3.00	1.90	1.26	56.00	0
3	5.00	1.90	1.26	56.00	0
4	7.00	1.90	1.26	56.00	0
5	9.00	1.90	1.26	56.00	0
...	...	...	...	...	...
16 259	270.00	4.40	1.56	50.00	0

Table 5. Fragment of the test sample for ANSIS (no wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Output
1	2.00	1.56	50.00	0
2	4.00	1.56	50.00	0
3	6.00	1.56	50.00	0
4	8.00	1.56	50.00	0
5	10.00	1.56	50.00	0
...	...	...	...	...
5422	289.00	1.56	50.00	1

Table 6. Fragment of the training package for ANSIS (wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
1	2.00	1.90	1.26	56.00	0
2	4.00	1.90	1.26	56.00	0
3	6.00	1.90	1.26	56.00	0
4	8.00	1.90	1.26	56.00	0
5	10.00	1.90	1.26	56.00	0
...	...	...	...	...	...
16 258	269.00	4.40	1.56	50.00	0

Table 7. ANFIS error values (no wind load) depending on the type of membership function and optimisation method

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method		
Triangular	8.90	8.86
Trapezoidal	9.01	8.96
Generalised bell-shaped	8.92	8.87
Gaussian	8.89	8.84
Gaussian combinational	9.01	8.96
Pi-shaped	9.05	9.00
Difference between two sigmoidal functions	8.78	8.73
Product of two sigmoidal functions	8.72	8.67
Backpropagation		
Triangular	10.85	10.79
Trapezoidal	10.78	10.73
Generalised bell-shaped	10.85	10.79
Gaussian	10.85	10.79
Gaussian combinational	10.77	10.79
Pi-shaped	10.76	10.70
Difference between two sigmoidal functions	10.78	10.72
Product of two sigmoidal functions	10.74	10.68

Table 8. ANFIS error values (wind load taken account of) depending on the type of membership function and optimisation method

Membership function	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method		
Triangular	7.30	7.26
Trapezoidal	7.34	7.29
Generalised bell-shaped	7.07	7.02
Gaussian	7.16	7.12
Gaussian combinational	7.34	7.30
Pi-shaped	7.36	7.31
Difference between two sigmoidal functions	7.31	7.27
Product of two sigmoidal functions	7.31	7.27
Backpropagation		
Triangular	7.97	7.93
Trapezoidal	7.91	7.87
Generalised bell-shaped	7.97	7.92
Gaussian	7.97	7.93
Gaussian combinational	7.91	7.87
Pi-shaped	7.91	7.86
Difference between two sigmoidal functions	7.91	7.86
Product of two sigmoidal functions	7.91	7.86

Types of membership functions for different optimisation methods were compared in the process of generating a system having a lattice partitioning algorithm and the following network parameters:

- number of training epochs — 100;
- number of member functions for each input — 3;
- error — 0;
- optimisation method — hybrid or backpropagation method.

According to the results provided in Tabl. 7, the smallest RMSE error for the ANFIS network designated for wind load free results, corresponds to the use of the product of two sigmoidal membership functions. For the ANFIS network, which generates a forecast taking into account the wind load, the smallest RMSE error, as it can be seen from Tabl. 8, corresponds to the application of the generalised bell-shaped membership function.

The results obtained are compared with the results obtained during system generation through subtractive clustering using the mining method. The following parameters were used to construct ANFIS networks using the sub-clustering method:

- vector of radii — 0.5;
- suppression coefficient — 1.25;
- acceptance coefficient — 0.5;
- rejection coefficient — 0.15;
- number of training epochs — 100.

The results, presented in Tabl. 9 and 10, demonstrate the following conclusions:

- The ANFIS network (1) designated for forecasting heat flows regardless of wind loads and (2) built using the sub-clustering method, is optimal (hybrid optimisation method);
- The ANFIS network (1) designated for forecasting heat flows with account taken of wind loads and (2) built using the sub-clustering method, is optimal (hybrid optimisation method).

Indeed, various types of membership functions, optimisation methods and system generation methods were compared, and it was discovered that it is optimal to use subcluster and hybrid optimisation methods, which provide lowest sample error values for ANFIS networks, that forecast heat flows with account/with no account taken of the wind load.

The developed ANFIS networks were used to create a set of rules to determine the dependence between heat flows inside tanks, having protective walls, and environmental factors. ANFIS networks are designed to create a predictive scenario for fire development in the main tank for tanks having protective walls.

The analysis shows that wind speed and tank location can rise the temperature of the air, the tank wall and

petrol. Therefore, despite the complexity of the analysis, consideration of all these factors allows forecasting a safe distance from a burning tank.

There is a difference between research results and experimental data. The reason for this may be that fire flares depend on other factors apart from wind speed, distance and angle, which were not included in the simulation model. In addition, time series may contain noise associated with unrecorded factor fluctuations.

Consequently, the following conclusion can be made: the ANFIS network built using the sub-clustering method is optimal (the optimisation method is hybrid).

Conclusion

In the research, the authors considered a fire development scenario inside the main tank having a protective wall, if the tank is the part of the tank farm.

The plan and the course of the field experiments are described in detail in this work (see Fig. 3–9). As a result of the experiment, the experimental data were collected (see Fig. 10 and 11) by SBG01 heat flow sensors.

Based on the experimental data, training and test samples were generated (see Tabl. 3–6) and dependences between the heat flow and the external environment were determined by means of ANFIS artificial neural networks.

Types of membership functions were compared to select an optimal function for ANFIS networks (wind load versus no wind load). It was found out that if the hybrid optimisation method is used, the product of two sigmoidal membership functions is the optimal type of the membership function for the ANFIS network constructed regardless of wind load (RMSE = 8.72 for the training sample, RMSE = 8.67 for the test sample). For the ANFIS network, that takes account of the wind load, the hybrid optimisation method provides the best results if the generalised bell-shaped membership function is used (RMSE = 7.07 for the training package, RMSE = 7.02 for the test package).

Table 9. ANFIS error values (regardless of the wind load) depending on the optimisation method applied to training and test samples

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method	8.33	8.28
Backpropagation	42.53	42.42

Table 10. ANFIS Error values (with account taken of the wind load) depending on the optimisation method applied to training and test samples

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method	6.61	6.56
Backpropagation	9.01	8.96

The analysis of ANFIS networks built using the sub-clustering method is carried out. It was found out that the sub-clustering method (coupled with the hybrid optimization method) provides lowest errors in the samples designated for predicting the heat flow using the ANFIS network with account/with no account taken of the wind load. Indeed, for the ANFIS network that takes no account of the wind load,

RMSE = 8.33 for the training sample, RMSE = 8.28 for the test sample, and for the ANFIS network that takes account of the wind load, RMSE = 6.61 for the training sample, RMSE = 6.56 for the test sample.

Scientific research made it possible to develop a model for the operational forecasting of heat flows using elements of artificial intelligence (ANFIS networks). In the presented study, the authors placed special emphasis on identifying the dependence between the heat flow and the wind load. The results obtained in the course of the work will increase the efficiency of containment and elimination of fires, safety of fire facilities and personnel, and reduce social, economic and environmental damage. The model for the operational forecasting of heat flows that takes account of the influence of environmental factors, including wind loads, can be integrated into management decision support systems designated for making managerial decisions on the arrangement of personnel and equipment in modern tank farms.

REFERENCES

1. Krasnov A.V., Sadykova Z.Kh., Perezhogin D.Yu., Mukhin I.A. Statistics of emergency accidents in the refining and petrochemical industry in 2007-2016. *Oil and Gas Business*. 2017; 6:179-191. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784379> (rus.).
2. Demekhin F.V., Tarantsev A.A., Belov D.I. On the problem of fire extinguishing in reservoirs having ring-type protective walls. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2013; 2:68-75. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V52/13.pdf> (rus.).
3. Petrova N.V., Cheshko I.D., Galishev M.A. Analysis of the expert practice of fire research into oil storage facilities. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2016; 3:40-46. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/7.pdf> (rus.).
4. Blinov V.I., Khudyakov G.N., Petrov I.I. *On the mechanism of extinguishing the combustion of oil products in tanks by mixing them with air*. Moscow, Information collection TsNIPO, 1958; 34-38. (rus.).
5. Petrov I.I., Reutt V.Ch. *Critical conditions for extinction of the flame of an oil product when it is stirred in a tank*. Moscow, Information collection TsNIPO, 1959; 58-61. (rus.).
6. Volkov O.M., Proskuryakov G.A. *Fire safety at the enterprises performing transportation and storage of oil and oil products*. Moscow, Nedra publ., 1981; 256. (rus.).
7. Abramov Yu.A., Basmanov A.E. Minimizing fire damage in tank farms. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2007; 4:59-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512034>
8. Zabetakis M.G., Burgess D.S. *Research on hazards associated with production and handling of liquid hydrogen*. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1961. DOI:10.2172/5206437
9. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission. Part 1: Slot-burner flames, comparison with jet flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1991; 23(1):1685-1692. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80443-1
10. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission — Part 2: Radiation and heat transfer from porous-metal wall burner flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1992; 24(1):1747-1752. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80204-3
11. Drysdale D. *An introduction to fire dynamic*. John Wiley & Sons, 2011; 512.
12. Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*. 1983; 19(4):251-261. DOI: 10.1007/BF02380810
13. Munoz M., Arnaldos J., Casal J., Planas E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*. 2004; 139(3):263-277. DOI: 10.1016/j.combust-flame.2004.09.001

14. Shvyrkov S.A., Vorobyev V.V., Ibatulin R.K. The danger of a cascading fire spreading in a tank farm with a wind effect. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 4(74):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/26-04-17.ttb.pdf> (rus.).
15. Rubtsov D.N., Shalymov M.S. About the spread of fire in a tank of the 'glass in the glass' type containing oil and oil products. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 3(67):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/23-03-16.ttb.pdf> (rus.).
16. Schälke S., Mishra K.B., Malow M., Berger A., Wehrstedt K.D., Schönbucher A. Mass burning rate of a large TBPB pool fire — experimental study and modeling. *Chemical Engineering Transactions*. 2013; 31:853-858. DOI: 10.3303/CET1331143
17. Shalymov M.S. Influence of thermal loads fire oil tanks on the body neighboring heated tank. *Technology of Technosphere Safety*. 2015; 2(60):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/16-02-15.ttb.pdf> (rus.).
18. Anwar Z., Afzal H., Bibi N., Abbas H., Mohsin A., Arif O. A hybrid-adaptive neuro-fuzzy inference system for multi-objective regression test suites optimization. *Neural Computing and Applications*. 2019; 31(11):7287-7301. DOI: 10.1007/s00521-018-3560-8
19. Zaichenko Yu.P., Sevaev F. The investigation of fuzzy neural network ANFIS in the problem of macroeconomic indexes forecasting. *System Research & Information Technologies*. 2005; 1:100-112. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13765> (rus.).
20. Leite R.M., Centenob F.R. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *Journal of Hazardous Materials*. 2018; 342:544-552. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.052
21. Yun-Wei Zhanga, Zhao-Lin Gua, Zan-She Wanga, Chuck Wah Francis Yua. Revisit of wind flows between wind tunnels and real canyons – the viewpoint of Reynolds dynamic similarity. *Indoor and Built Environment*. 2013; 22(3):467-470. DOI: 10.1177/1420326X12489064

Received July 29, 2020; Received in revised form August 5, 2020;

Accepted August 18, 2020

Information about the authors

Tatiana S. STANKEVICH, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technosphere Safety Department, Kaliningrad State Technical University (KSTU), Kaliningrad, Russian Federation; Master's Degree Student, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 717673; ResearcherID: O-7418-2017; Scopus Author ID: 57214781783; ORCID: 0000-0002-8707-7187; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Dalibor BALNER, Ph.D., Engineer, Faculty of Safety Engineering, Department of Security Services, Ostrava Technical University, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 57194767595; ORCID: 0000-0003-4071-1918; e-mail: dalibor.balner@vsb.cz

Martin TRCKA, Ph.D., Engineer, Faculty of Safety Engineering, Department of Fire Protection, Ostrava Technical University, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 56330779100; ORCID: 000-0002-4574-229X; e-mail: martin.trcka@vsb.cz

Adam THOMITZEK, Ph.D., Engineer, Department of Fire Protection, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 56331461400; ORCID: 0000-0002-6697-8787; e-mail: adam.thomitze@vsb.cz

Полевое моделирование динамики пожара при ответе на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации своих функций

© И.Р. Хасанов¹ ✉, А.В. Карпов¹, С.Ф. Лобова², Н.В. Петрова²

- 1 Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)
- 2 Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ выполнения системой пожарной сигнализации своих функций необходим при ответе на вопрос о соответствии системы требованиям пожарной безопасности. Данный вид исследования часто проводится при производстве судебной нормативной пожарно-технической экспертизы. В связи с этим для оценки выполнения системой пожарной сигнализации своих функций необходимо определить условия развития пожара и безопасной эвакуации людей.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является численное исследование влияния на работу пожарной сигнализации используемых математических моделей горения, характеристик пожарной нагрузки и расположения очага пожара.

Методика. Для достижения цели исследования использовалось полевое моделирование динамики пожара. При моделировании работы системы пожарной сигнализации проведены расчеты распространения опасных факторов пожара при различных сценариях расположения очага горения.

Результаты и их обсуждение. Проведенные расчеты выполнения условий безопасной эвакуации людей в случае ненормативного расположения пожарных извещателей позволили отработать алгоритм расчета времени начала эвакуации. Показано, что расчетное время обнаружения пожара зависит от используемых моделей горения (средний или сложный уровень), размеров расчетной сетки, характеристик пожарной нагрузки и расположения очага пожара.

Выводы. Показано, что на результаты полевого моделирования развития пожара и времени его обнаружения оказывают влияние используемые модели горения, характеристики пожарной нагрузки и расположение очага пожара относительно пожарных извещателей. При невыполнении системой пожарной сигнализации своих функций и, следовательно, несоблюдении условий безопасной эвакуации необходимо либо уточнение модели горения, либо проведение сравнения результатов моделирования при нормативном и фактическом размещении извещателей.

Ключевые слова: пожарная безопасность; пожарно-техническая экспертиза; пожарный извещатель; обнаружение пожара; математическая модель горения; пожарная нагрузка; очаг пожара; эвакуация

Для цитирования: Хасанов И.Р., Карпов А.В., Лобова С.Ф., Петрова Н.В. Полевое моделирование динамики пожара при ответе на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации своих функций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 40–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50

✉ Хасанов Ирек Равильевич, e-mail: irhas@rambler.ru

Field modeling of the fire dynamics as an answer to the question about the fire alarm performance

© Irek R. Khasanov¹ ✉, Alexey V. Karpov¹, Sofia F. Lobova², Natalia V. Petrova²

- 1 All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (mkr. VNIPO, 12, Balashiha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)
- 2 Research Institute for Advanced Research and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The performance of a fire alarm needs to be analyzed to answer the question about its compliance with fire safety requirements. This type of research is frequently performed in the course of a forensic fire investigation. Therefore, it is necessary to identify conditions of fire escalation and safe evacuation of people to assess the fire alarm performance.

Purposes and objectives. The purpose of this work is the numerical study of the impact, produced by mathematical models of combustion, characteristics of fire loads and locations of fire beds, on fire alarm performance.

Methods. Fire dynamics was field modeled to achieve the goal of this research. The analysis of flame propagation was performed with regard for various fire bed locations to simulate the fire alarm operation.

Results and discussion. The fulfillment of safe evacuation conditions for cases of irregular arrangement of smoke detectors was analyzed to develop and test the algorithm for the calculation of the evacuation start time. It is shown that the estimated time of fire detection depends on combustion models employed (their average or complex level), the size of the computational grid, fire load specifications and the location of the fire bed.

Conclusions. It is shown that the results of the field modeling of fire propagation and detection time are influenced by combustion models used, fire load specifications and the location of the fire bed in relation to smoke detectors. If the fire alarm fails to perform its functions and, consequently, safe evacuation conditions are not fulfilled, it is necessary either to improve the combustion model or to compare the modeling results obtained for actual and standard smoke detector location patterns.

Keywords: fire safety; fire investigation; smoke detector; fire detection; mathematical combustion model; fire load; fire bed; evacuation

For citation: Khasanov I.R., Karpov A.V., Lobova S.F., Petrova N.V. Field modeling of the fire dynamics as an answer to the question about the fire alarm performance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):40-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50 (rus.).

✉ Irek Ravil'evich Khasanov, e-mail: irhas@rambler.ru

Введение

Судебная нормативная пожарно-техническая экспертиза (СНПТЭ) — это вид экспертизы, заключающийся в исследовании на основе специальных знаний в области пожарной безопасности нарушений нормативных противопожарных требований, а также причинной связи таких нарушений с возникновением, развитием и последствиями пожара (происшедшим или потенциально возможным) [1].

Часто при производстве СНПТЭ в судебно-экспертных учреждениях Федеральной противопожарной службы МЧС России экспертам необходимо ответить на вопросы, касающиеся оценки соответствия той или иной системы противопожарной защиты требованиям пожарной безопасности. Для ответа на подобные вопросы экспертам необходимо рассмотреть способность данных систем выполнять свои функции в условиях пожара с учетом их фактических характеристик. Особенно важно проведение таких исследований при производстве экспертиз пожаров, в результате которых погибли люди, поскольку всегда возникает вопрос о наличии либо отсутствии на объекте на момент возникновения пожара угрозы жизни и здоровью людям. Также необходимость оценки способности систем противопожарной защиты выполнять свои функции возникает при проведении исследований в отношении объектов, на которых пожар не произошел, но на которых имеется значительное количество отступлений от требований нормативных документов по пожарной безопасности. Эксперту в подобной ситуации необходимо ответить на вопрос о влиянии того или иного нарушения на потенциальную угрозу жизни и здоровью людей в случае возникновения пожара.

В обеспечении своевременной эвакуации при пожаре система пожарной сигнализации (автомати-

ческая установка пожарной сигнализации (АУПС)) играет важную роль. АУПС должна обеспечивать автоматическое обнаружение пожара за время, необходимое для включения систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) в целях организации безопасной (с учетом допустимого пожарного риска) эвакуации людей в условиях конкретного объекта. При этом безопасная эвакуация людей из зданий и сооружений при пожаре считается обеспеченной, если интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в безопасную зону не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре.

Требования к АУПС и СОУЭ определены положениями Федерального закона № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — ФЗ № 123)¹, сводами правил СП 5.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования»², СП 3.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности»³, а также иными документами, содержащими требования пожарной безопасности к данной системе. Аналогичные документы,

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 4.07.2008 г. : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 г.

² Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : СП 5.13130.2009 : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25.03.2009 г. № 175.

³ Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности : СП 3.13130.2009 : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25.03.2009 г. № 173.

в которых изложены требования по проектированию, монтажу, вводу в эксплуатацию и техническому обслуживанию систем, используются и за рубежом, например, NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code.

Порядок и методики определения расчетного и необходимого времени эвакуации людей при пожаре содержатся в [2, 3]. Для практического использования методик разработаны пособия по расчету пожарного риска для общественных [4] и производственных объектов [5].

Таким образом, согласно [2–5], анализ соответствия АУПС требованиям пожарной безопасности в части выполнения ею своих функций проводится, в том числе, с помощью математических расчетов, необходимость проведения которых также определена методологией судебной пожарно-технической экспертизы [6].

Наиболее информативным и универсальным инструментом проведения данного анализа является полевое моделирование динамики пожара. Важно отметить, что область применения математических расчетов также распространяется на процесс проектирования АУПС, когда возникают вопросы эффективного размещения устройств обнаружения пожара (извещателей) и определения расстояния между ними, учета влияния конструктивных особенностей и объема помещений и др. [7].

Применение полевого моделирования динамики пожара при ответе на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации своих функций имеет ряд особенностей, выражающихся в значительной зависимости результатов от способов моделирования начальной стадии пожара.

В работе [8] проведена оценка времени обнаружения пожара на основе полевого моделирования динамики пожара в офисном помещении и в двухкомнатной квартире. Авторами показано, что темп развития пожара является определяющим фактором, влияющим на время обнаружения пожара.

Полевая математическая модель для расчета локальных значений параметров припотолочных струй продуктов горения в начальной стадии пожара использована в [9] для обоснования соотношений, используемых в инженерных расчетах для оценки времени срабатывания пожарных извещателей.

В работе [10] рассмотрены проблемы оценки времени начала эвакуации при пожаре в зависимости от наличия СОУЭ, а также ее инерционности и эффективности. При этом указывается, что время начала эвакуации — это совокупность технической, зависящей от параметров систем обнаружения пожара, и психофизической, связанной с восприятием сигнала и принятием решения об эвакуации, составляющих.

Численное моделирование развития пожара и влияние скоростей газовых потоков с учетом работы системы дымоудаления, а также оценка в этих условиях необходимого времени эвакуации людей проведены в [11].

Влияние особенностей помещений с высокими потолками и сложной геометрией на реакцию дымовых извещателей при пожаре рассмотрено в [12]. В этих целях авторами использованы зонная и полевая модели и проведено сравнение с экспериментальными результатами.

Численное исследование при помощи полевой модели влияния конструктивных элементов потолков (потолочные преграды, балочные перекрытия, наклон потолка) на время срабатывания извещателей систем обнаружения пожара рассмотрено в [13]. Показано, что потолочные препятствия в виде балок, а также наклон потолка могут значительно изменять поток движения продуктов горения и, следовательно, должны учитываться при разработке конкретной системы обнаружения пожара. В работе [14] приведены результаты теоретического исследования и выводы о том, что провести реконструкцию начальной стадии пожара возможно с учетом времени срабатывания пожарных извещателей. Полевое моделирование пожара используется также при расчетах особенностей эвакуации людей при пожаре [15] и при оценке развития пожара с возможностью выхода пламени из помещения [16].

Анализ работ по моделированию воздействия параметров пожара на АУПС показал необходимость учета в моделях многочисленных особенностей развития пожара и объемно-планировочных характеристик помещений. Обусловлено это тем, что моделируемые течения (поток продуктов горения) являются турбулентными, неизотермичными, многофазными и нестационарными, а также имеют сложный химический состав и сопровождаются горением и сложным сопряженным теплообменом с ограждающими конструкциями.

Таким образом, эффективным способом оценки динамики распространения опасных факторов пожара и их взаимодействия с системами противопожарной защиты является полевое моделирование, основанное на решении системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса, описывающих физико-химические явления при пожаре [17–20].

Однако применение данного способа для ответа на вопросы о выполнении системой противопожарной защиты своих функций сопряжено с многочисленными трудностями, связанными с отсутствием методологии по построению численного эксперимента для исследований данного вида и по корректной обработке результатов моделирования.

В связи с этим в настоящей работе в целях ответа на вопрос о выполнении АУПС и СОУЭ своих функций исследовано влияние используемых моделей горения, характеристик пожарной нагрузки и расположения очага пожара на получаемые результаты полевого моделирования. Продемонстрирован вариант алгоритма построения численного эксперимента, включающего полевое моделирование динамики пожара.

Методика исследования

Для расчетной оценки выполнения АУПС своих функций на выбранном объекте защиты использована компьютерная программа FDS в оболочке PyroSim [21], которая содержит встроенные модели отклика (срабатывания) пожарных извещателей, основанные на экспериментальных и численных исследованиях.

В ходе выполнения расчета в данной программе были проанализированы два способа моделирования горения, соответствующие среднему и сложному уровню [22]. Средний уровень сложности модели предполагает фиксированный, наперед заданный поверхностный поток горючего. Рассматривалось газофазное горение, но без обратного влияния пламени на скорость газификации конденсированного (жидкого или твердого) горючего. Сложный уровень моделирования предполагает расчет горения в системе с тепловой обратной связью: скорость газификации горючих материалов определяется тепловым потоком из зоны пламени (моделирование пиролиза) [22]. Анализируя полученные результаты, авторы [23] пришли к выводу, что при моделировании начальной стадии пожара, когда и происходит срабатывание пожарных извещателей, необходимо проведение выбора и обоснования способа моделирования горения. Способ моделирования горения должен быть наиболее приближен к реальным условиям, имеющимся на объекте, либо должен отражать наихудшие условия для срабатывания пожарных извещателей.

В данной статье в качестве примера применения полевого моделирования для анализа выполнения АУПС своих функций была рассмотрена ситуация, когда линейные пожарные дымовые извещатели были расположены ниже рекомендуемого расстояния от перекрытия. В качестве объекта защиты, на котором проводилось моделирование, рассматривалось здание, представляющее собой 4-этажный спортивный комплекс, I степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0, класса функциональной пожарной опасности Ф3.6.

Противопожарная защита здания включала в себя следующие системы противопожарной защи-

ты, направленные на обеспечение безопасности людей (создание условий безопасной эвакуации и тушение пожара в его начальной стадии):

- систему автоматической пожарной сигнализации адресно-аналогового типа с применением линейных дымовых пожарных извещателей;
- систему оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре 3-го типа;
- систему противодымной защиты;
- автономные установки пожаротушения.

В соответствии с проектом в состав АУПС объекта входили извещатели пожарные дымовые линейные ИПДЛ-Д-1/4р с настроенным порогом срабатывания, равным 1,6 дБ (31 %).

Согласно СП 5.13130.2009, излучатель и приемник линейного дымового пожарного извещателя следует устанавливать на стенах, перегородках, колоннах и других конструкциях, обеспечивающих их жесткое крепление таким образом, чтобы их оптическая ось проходила на расстоянии не менее 0,1 м и не более 0,6 м от уровня перекрытия. Допускается размещение извещателей ниже 0,6 м от уровня перекрытия, если расчетное время обнаружения достаточно для выполнения задач противопожарной защиты: суммарное значение времени обнаружения пожара извещателями и расчетного времени эвакуации людей не должно превышать времени наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара (ОФП). Другими словами, должен быть выполнен анализ выполнения условий безопасной эвакуации людей в случае возникновения пожара.

На рассматриваемом объекте в спортивном зале размерами 17,63 × 42,1 × 13,1 м извещатели ИПДЛ-Д-1/4р были установлены так, что их оптическая ось проходила на расстоянии более 0,6 м от перекрытия. Фактически на расстоянии 4 м от перекрытия был расположен 1-й ярус извещателей, а на расстоянии 8 м — 2-й ярус (рис. 1). Соответственно, согласно требованиям ФЗ № 123, должно быть проведено подтверждение, что расчетное время обнаружения пожара извещателями достаточно для выполнения задач противопожарной защиты.

Выбор сценариев развития пожара определялся наихудшими условиями эвакуации и динамики распространения опасных факторов пожара. Под наихудшими условиями динамики распространения ОФП понимались в данном случае такие, которые приводили бы к наиболее позднему срабатыванию пожарных извещателей.

Для определения указанных условий были рассмотрены два сценария с различным расположением очага пожара: аварийная ситуация № 1 — очаг распо-

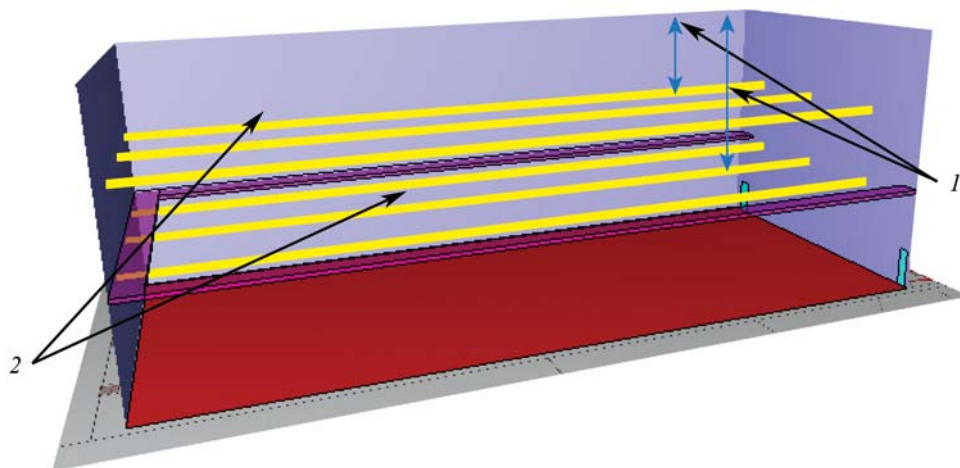


Рис. 1. Схема размещения пожарных извещателей в спортивном зале: 1 — расстояние от перекрытия; 2 — оптические оси пожарных извещателей

Fig. 1. The layout of smoke detectors in a gymnasium: 1 — the distance from the slab; 2 — optical axes of smoke detectors

ложен между оптическими осями; аварийная ситуация № 2 — очаг расположен около стены помещения (рис. 2). Параметры пожарной нагрузки соответствовали типовой пожарной нагрузке в спортзалах [2]: низшая теплота сгорания 16,7 МДж/кг; удельная массовая скорость выгорания 0,014 кг/(м²·с); линейная скорость распространения пламени 0,0045 м/с; удельный расход кислорода 2,56 кг/кг; дымообразующая способность горящего материала 61 Нп·м²/кг.

Контрольные точки замера (датчики) ОФП располагались на различных уровнях: на высоте 1,7 м от уровня 1-го этажа напротив выходов из спортивного зала; на высоте 1,7 м от уровня расположения

балконов напротив выходов из здания на улицу.

Выбор разрешающей способности расчетной сетки осуществлялся на основе рекомендаций [24]. Важно отметить, что определение оптимальной разрешающей способности расчетной сетки является одним из ключевых этапов проведения моделирования динамики пожара с использованием полевой модели. Согласно [25], размер ячейки сетки должен быть таким, чтобы крупномасштабные вихревые структуры, присущие естественно-конвективным турбулентным диффузионным пламенам, наблюдаемым при пожарах, были разрешены.

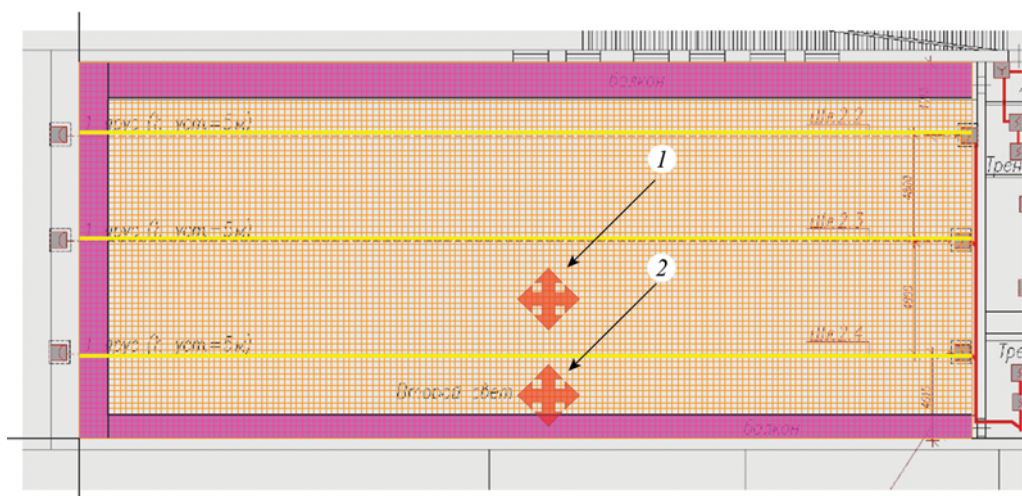


Рис. 2. Схема размещения очагов пожара в спортивном зале: 1 — расположение очага пожара для аварийной ситуации № 1; 2 — расположение очага пожара для аварийной ситуации № 2

Fig. 2. Location of fire beds in a gym: 1 — the fire bed location for emergency situation 1; 2 — the fire bed location for emergency situation 2

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования развития пожара были получены значения времени срабатывания извещателей. На рис. 3 и 4 представлены расчетные показания дымовых извещателей, при срабатывании которых осуществлялся запуск системы АУПС в рассматриваемых аварийных ситуациях. В случае аварийной ситуации № 1 первый извещатель срабатывал через 180...185 с после начала горения при условии его настройки на затухание, равное 31 %, второй извещатель — через 190...195 с. В случае аварийной ситуации № 2 первый извещатель срабатывал через 150...155 с, второй извещатель — через 165...170 с.

Таким образом, расположение очага пожара между оптическими осями приводило к формированию наихудших условий для срабатывания пожарных извещателей. Поэтому для дальнейшего анализа выполнения условий безопасной эвакуации

людей были использованы параметры аварийной ситуации № 1.

Далее, в условиях аварийной ситуации № 1, в соответствии с положениями методики [2], было определено время эвакуации людей из помещений здания $\tau_{эв}$ и время блокирования эвакуационных выходов $\tau_{бл}$. Анализ выполнения условий безопасной эвакуации проводился путем сравнения необходимого и фактического времени эвакуации. При этом в рассматриваемом случае к расчетному времени эвакуации τ_p необходимо было прибавить время начала эвакуации $\tau_{нэ}$ с учетом срабатывания системы пожарной сигнализации.

В соответствии с п. 1.1 Приложения 5 [2], значение времени начала эвакуации $\tau_{эв}$ для помещения с очагом пожара, в данном случае для спортивного зала, следует принимать равным 12,5 с, ($\tau_{нэ} = 5 + 0,01F = 5 + 0,01 \cdot 750$, где F — площадь помещения очага пожара, m^2).

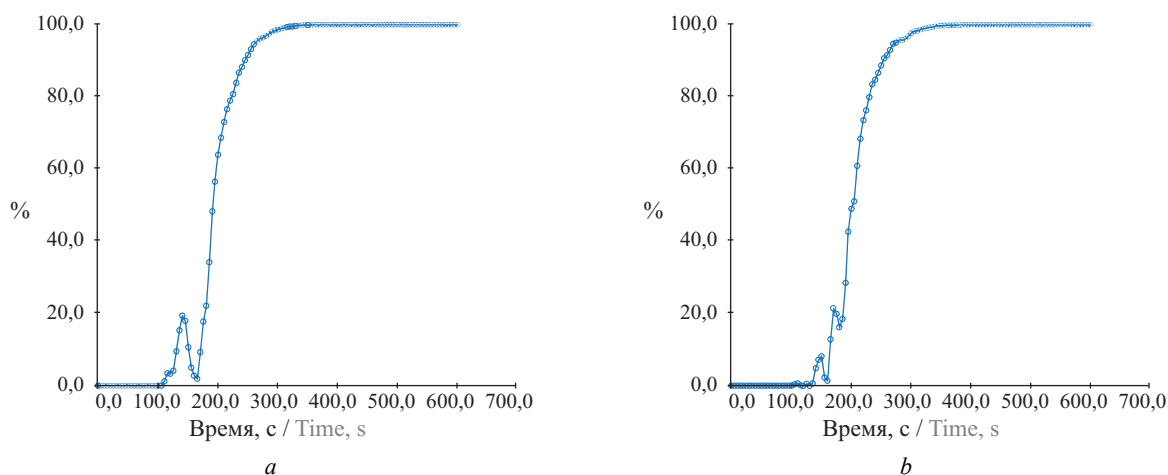


Рис. 3. Показания пожарных извещателей при аварийной ситуации № 1: *a* — первого извещателя; *b* — второго извещателя
Fig. 3. Smoke detector readings for emergency situation 1: *a* — the first smoke detector; *b* — the second smoke detector

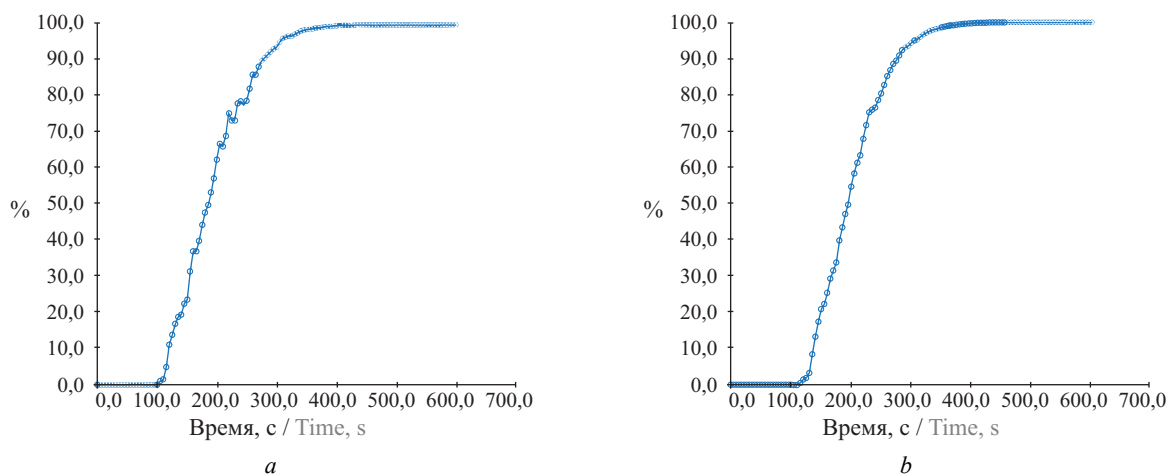


Рис. 4. Показания извещателей при аварийной ситуации № 2: *a* — первого извещателя; *b* — второго извещателя
Fig. 4. Smoke detector readings for emergency situation 2: *a* — the first smoke detector; *b* — the second smoke detector

Время начала эвакуации для остальных помещений в рассматриваемом примере определялось как сумма времени срабатывания пожарных извещателей и времени начала эвакуации, установленного в Приложении 5 [2], для здания класса функциональной пожарной опасности Ф3.6 и 3-го типа СОУЭ.

Обоснование данного подхода к определению времени начала эвакуации лежит в следующем. Табличные значения, приведенные в Приложении 5 [2], содержат техническую задержку, связанную с временем срабатывания систем обнаружения и оповещения АУПС и СОУЭ, и психоэмоциональную, связанную с контингентом и родом деятельности людей на данном объекте защиты. В то же время данные значения даны для систем, выполненных в соответствии с требованиями пожарной безопасности. При отступлении от нормативных требований с определенным запасом надежности предполагается, что время начала эвакуации увеличится на величину, которая и была определена в ходе моделирования пожара как время срабатывания пожарных извещателей. Другими словами, данный способ учета времени срабатывания АУПС

является оценкой сверху. Таблица содержит итоговую информацию о выполнении в рассматриваемом здании условий безопасной эвакуации.

Результаты расчетов, приведенные в таблице, показали, что интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре. Условия безопасной эвакуации людей из рассматриваемых помещений здания спортивного комплекса при принятом расположении линейных пожарных дымовых извещателей (ниже 0,6 м от перекрытия) выполняются.

Таким образом, проведенное расчетное обоснование фактического расположения линейных пожарных дымовых извещателей ниже перекрытия спортивного зала на высоте 4 м и 8 м подтвердило возможность АУПС выполнить свои функции в случае возникновения пожара.

Следует отметить, что в данном случае был получен положительный результат: АУПС выполняет свои функции. Соответственно, можно утверждать, что при максимально завышенной оценке, выразившейся в суммировании табличного времени и времени срабатывания извещателя, и выполнении

Результаты расчета времени эвакуации людей $\tau_{эв}$ и необходимого времени эвакуации $\tau_{нв}$ с учетом времени начала эвакуации $\tau_{нз}$ для аварийной ситуации № 1

Estimated evacuation time $\tau_{эв}$ and required evacuation time $\tau_{нв}$ with regard for evacuation start time $\tau_{нз}$ for emergency situation 1

Эвакуационный выход Emergency exit	Расчетное время эвакуации τ_p , мин Estimated evacuation time τ_e , min	Время начала эвакуации, $\tau_{нз}$, мин Evacuation start time τ_{es} , min	Время эвакуации $\tau_{эв} = \tau_p + \tau_{нз}$ Evacuation time $\tau_{эв}$, min $\tau_{эв} = \tau_e + \tau_{es}$	Необходимое время эвакуации $\tau_{нв}$, мин $\tau_{нв} = \tau_{бл} \cdot 0,8$ Required evacuation time $\tau_{нв}$, min $\tau_{нв} = \tau_{bl} \cdot 0,8$	Выполнение условия безопасной эвакуации: $\tau_{эв} \leq \tau_{бл} \cdot 0,8$ Evacuation safety condition fulfillment: $\tau_{эв} \leq \tau_{bl} \cdot 0,8$
Выход с балкона_01 Balcony exit_01	0,79	0,2	0,99	5,8	Выполняется Fulfilled
Выход с балкона_02 Balcony exit_02	1,08	0,2	1,28	5,5	Выполняется Fulfilled
Выход из зала 01 Gymnasium exit 01	2,26	0,2	2,46	7,9	Выполняется Fulfilled
Выход из зала 02 Gymnasium exit 02	2,27	0,2	2,47	8,0	Выполняется Fulfilled
Выход_01 Exit_01	3,49	4,25* (1,0 + 3,25)	7,74	7,9	Выполняется Fulfilled
Выход_02 Exit_02	2,72	4,25* (1,0 + 3,25)	6,97	8,0	Выполняется Fulfilled
Выход со 2-ого этажа 2nd floor exit	1,16	4,25* (1,0 + 3,25)	5,41	5,5	Выполняется Fulfilled

*Время начала эвакуации $\tau_{нз}$ для выходов с этажа и из здания определялось как сумма табличного значения из Приложения 5 методики [2] и значения времени срабатывания пары извещателей в помещении очага пожара.

*Evacuation start time τ_{es} for floor and building exits was identified as the sum of values, provided in Appendix 5 of the guidelines [2] and the activation time of a couple of smoke detectors in the room where the bed of fire is located.

условий безопасной эвакуации, такой подход оправдан и может быть использован для формулирования соответствующих выводов при производстве СНПТЭ. При получении отрицательного результата, когда при максимально завышенной оценке не выполняются условия безопасной эвакуации, однозначный вывод о невыполнении рассматриваемой АУПС своих функций сделать нельзя, и необходимо уточнение расчетной модели. Если сформулировать вывод на данном этапе исследования без уточнения модели, то он будет некорректным в силу принятых допущений.

Уточнение расчетной модели может включать несколько этапов:

- уменьшение размеров ячейки расчетной сетки или ее сгущение в области очага и расположения пожарных извещателей;
- дифференцирование табличного значения начала эвакуации, приведенное в Приложении 5 [2], на техническую и психоэмоциональную составляющие;
- уточнение модели срабатывания пожарных извещателей, встроенной в программное обеспечение (при ее наличии);
- уточнение модели сажеобразования;
- уточнение модели начальной стадии распространения фронта горения.

В случае получения отрицательного результата и при отсутствии возможности уточнения модели допускается проведение двух расчетов: один с ненормативным расположением извещателей, другой — с нормативным, т.е. проведение сравнительного анализа. В этом случае к табличному времени начала эвакуации, приведенному в Приложении 5 [2], следует прибавлять не значения времени срабатывания датчиков, а разность между срабатываниями пожарных извещателей в двух рассмотренных сценариях.

Выводы

Для ответа на вопрос о выполнении АУПС своих функций необходимо проведение анализа

выполнения условий безопасной эвакуации людей в случае пожара, установленных ФЗ № 123.

Компьютерное моделирование с применением полевой модели динамики пожара является наиболее информативным способом расчета распространения ОФП, учитывающим объемно-планировочные особенности объекта защиты, характеристики АУПС и параметры очага пожара.

При полевом моделировании, оценивающем работу системы пожарной сигнализации при заданных условиях, требуется анализ особенностей начальной стадии развития пожара.

Расчетное время обнаружения пожара зависит от используемых моделей горения (средний или сложный уровень), характеристик пожарной нагрузки, расположения очага пожара относительно извещателей и моделей физических процессов, встроенных в используемый для моделирования программный комплекс. Соответственно, данные параметры при проведении расчета должны быть соответствующим образом обоснованы.

Для определения времени начала эвакуации допустимо использовать оценку сверху, при которой значения времени, приведенные в Приложении 5 [2], и расчетные значения времени срабатывания пожарных извещателей суммируются.

В случае получения отрицательного результата, когда при максимально завышенной оценке не выполняются условия безопасной эвакуации и когда формулировка категоричного вывода о выполнении АУПС своих функций не представляется возможной, необходимо уточнение расчетной модели пожара.

Допускается проведение двух расчетов: один с ненормативным расположением извещателей, другой — с нормативным. В этом случае к табличному значению времени начала эвакуации, приведенному в Приложении 5 [2], следует прибавлять не значения времени срабатывания датчиков, а разность между значениями времени срабатывания пожарных извещателей в двух рассмотренных сценариях (сравнительный анализ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов С.П., Кондратьев С.А., Петрова Н.В., Скодтаев С.В., Тумановский А.А. Судебная нормативная пожарно-техническая экспертиза. СПб. : СПб УГПС МЧС России, 2014. 92 с.
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. 2-е изд. М. : ВНИИПО, 2016. 79 с.
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. М. : ВНИИПО, 2009. 77 с.
4. Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М. и др. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.

5. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Кириллов Д.С., Трунева В.А., Гилетич А.Н. и др. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. М. : ВНИИПО, 2012. 242 с.
6. Методология судебной пожарно-технической экспертизы: основные принципы. М. : ВНИИПО, 2013. 23 с.
7. Schiffliti R.P., Custer R.L.P., Meacham B.J. Design of detection systems // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 40. 5th Edition. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1314–1377. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
8. Калмыков С.П., Есин В.М. Время обнаружения очага пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 11. С. 52–63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63
9. Карпов А.В., Рыжов А.М. Полевое моделирование тепло- и массопереноса в припотолочной струе продуктов горения над нестационарными очагами пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2001. Т. 10. № 3. С. 17–24.
10. Самошин Д.А., Холцевников В.В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 5. С. 37–51. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51
11. Puzach S.V., Nguyen Thanh Hai. Influence of the rates of gas flows through the smoke-removal and input-ventilation systems on the height of the smoke-free zone in a fire within a building // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2009. Vol. 82. No. 6. Pp. 1033–1041. DOI: 10.1007/s10891-010-0290-x
12. Kuffner W., Hadjisophocleous G. Method of determining smoke detector spacing in high ceiling applications // Fire Technology. 2010. Vol. 50. No. 3. Pp. 1–22. DOI: 10.1007/s10694-010-0141-5/
13. Forney G., Bukowski R., Davis W. Field modeling: simulating the effect of sloped beamed ceilings on detector and sprinkler response, Technical Report Year 2. Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 1994. 41 p.
14. Лобаев И.А., Вечтомов Д.А., Плешаков В.В. Реконструкция начальной стадии пожара с учётом параметров системы обнаружения опасных факторов пожара // Технологии техносферной безопасности. 2018. Вып. 3 (79). С. 19–27. DOI: 10.25257/TTS.2018.3.79.19-27
15. Кирик Е.С., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Харламов Е.Б., Малышев А.В. Математическое моделирование эвакуации при пожаре // Математическое моделирование. 2014. Т. 26 (1). С. 3–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21276919>
16. Khasanov I.R., Karpov A.V. Modeling fire spread along the non-combustible building facades of different geometry // Proceeding of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). St. Petersburg Polytechnic University Press, 2019. Pp. 534–541. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-1
17. Cox G. Turbulent closure and the modelling of fire using computational fluid dynamics // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1998. Vol. 356. No. 1748. Pp. 2835–2854. DOI: 10.1098/rsta.1998.0300
18. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke // Journal of Fire Protecting Engineering. 2003. Vol. 13. No 2. Pp. 87–110. DOI: 10.1177/1042391503013002001
19. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
20. Рыжов А.М., Хасанов И.Р., Карпов А.В., Волков А.В., Лицкевич В.В., Дектерев А.А. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях : методические рекомендации. М. : ВНИИПО, 2002. 35 с.
21. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p. DOI: 10.6028/nist.sp.1018
22. Снегирёв А.Ю. Моделирование тепломассообмена и горения при пожаре : дис. ... д-ра техн. наук. СПб. : С.-Петербург. политехн. ун-т, 2004. 271 с.
23. Лобова С.Ф., Принцева М.Ю. Оценка влияния исходных данных на результаты моделирования распространения горения при оценке эффективности работы автоматической установки пожарной сигнализации // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2019. № 3. С. 70–80. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V113/11.pdf>

24. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator User's Guide: NIST Special Publication 1019. Sixth Edition. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013. 262 p.
25. Снегирев А.Ю., Талалов В.А. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение неперемешанных реагентов : учебное пособие. СПб : С.-Петербург. политехн. ун-т, 2008. 212 с.

REFERENCES

1. Voronov S.P., Kondratev S.A., Petrova N.V., Skodtaev S.V., Tumanovsky A.A. *Judicial normative fire-technical expertise*. St. Petersburg, SPbU GPS of EMERCOM of Russia, 2014; 92. (rus.).
2. *Method for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard*. 2nd ed. Moscow, VNIPO, 2016; 79. (rus.).
3. *Method for determining the calculated values of fire risk at production facilities*. Moscow, VNIPO, 2009; 77. (rus.).
4. Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V., Fomin M.V., Giletich A.N., Komkov P.M. et al. *Handbook on application of "Method for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, VNIPO, 2014; 226. (rus.).
5. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Kirillov D.S., Truneva V.A., Giletich A.N. et al. *Manual for determining the calculated values of fire risk for production facilities*. Moscow, VNIPO, 2012; 242. (rus.).
6. *Methodology of forensic fire-technical expertise: basic principles*. Moscow, VNIPO, 2013; 23. (rus.).
7. Schifiliti R.P., Custer R.L.P., Meacham B.J. Design of detection systems. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 40. Fifth Edition*. Society of Fire Protection Engineers, 2016; 1314-1377. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
8. Kalmykov S.P., Esin V.M. Fire detection time. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):52-63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63. (rus.).
9. Karpov A.V., Ryzhov A.M. CFD modelling of heat and mass transfer in combustion products ceiling jet over unsteady fire sources. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(3):17-24. (rus.).
10. Samoshin D.A., Kholshchevnikov V.V. Problems of regulation of time to start evacuation. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(5):37-51. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51. (rus.).
11. Puzach S.V., Nguyen Thanh Hai. Influence of the rates of gas flows through the smoke-removal and input-ventilation systems on the height of the smoke-free zone in a fire within a building. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2009; 82(6):1033-1041. DOI: 10.1007/s10891-010-0290-x
12. Kuffner W., Hadjisophocleous G. Method of determining smoke detector spacing in high ceiling applications. *Fire Technology*. 2010; 50(3):1-22. DOI: 10.1007/s10694-010-0141-5/
13. Forney G., Bukowski R., Davis W. *Field modeling: simulating the effect of sloped beamed ceilings on detector and sprinkler response, technical report year 2*. Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 1994; 41.
14. Lobaev I.A., Vechtomov D.A., Pleshakov V.V. Reconstruction of the initial stage of the fire within the parameters of the detection system of dangerous fire factors. *Technology of technosphere safety*. 2018; 3(79): 19-27. DOI: 10.25257/TTS.2018.3.79.19-27 (rus.).
15. Kirik E.S., Degtyarev A.A., Litvintsev K.Yu., Kharlamov E.B., Malyshev A.V. Mathematical modeling of fire evacuation. *Matematicheskoe modelirovanie/Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014; 26(1):3-16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21276919> (rus.).
16. Khasanov I.R., Karpov A.V. Modeling fire spread along the non-combustible building facades of different geometry. *Proceeding of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9)*. St. Petersburg Polytechnic University Press, 2019; 534-541. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-1
17. Cox G. Turbulent closure and the modelling of fire using computational fluid dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1998; 356(1748):2835-2854. DOI: 10.1098/rsta.1998.0300
18. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protecting Engineering*, 2003; 13(2):87-110. DOI: 10.1177/1042391503013002001
19. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 32. Fifth Edition Society of Fire Protection Engineers*, 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0

20. Ryzhov A.M., Khasanov I.R., Karpov A.V., Volkov A.V., Litskevich V.V., Degtyarev A.A. *Application of the field method of mathematical modeling of fires in premises. Methodical recommendation*. Moscow, VNIPO, 2002; 35. (rus.).
21. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M. *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013; 149. DOI: 10.6028/nist.sp.1018
22. Snegirev A.Yu. *Modeling of heat and mass transfer and burning in the fire : dissertation... doctor of technical sciences*. Saint Petersburg, 2004; 271. (rus.).
23. Lobova S.F., Printc'eva M.U. Estimation of the influence of the initial data on the results of the modeling of the fire spread during the automatic fire alarm system effectivity analysis. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2019; 3:70-80. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V113/11.pdf> (rus.).
24. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator User's Guide: NIST Special Publication 1019. Sixth Edition*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 262.
25. Snegirev A.Yu., Talalov V.A. Theoretical bases of fire and explosion safety. Burning unturned reagents: tutorial. Saint-Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 2008; 212. (rus.).

Поступила 24.09.2020, после доработки 01.10.2020;

принята к публикации 07.10.2020

Received September 24, 2020; Received in revised form October 1, 2020;

Accepted October 7, 2020

Информация об авторах

ХАСАНОВ Ирек Равильевич, д-р. техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Московская область, Российская Федерация; РИНЦ ID: 157014; ResearcherID: T-4177-2017; ORCID: 0000-0002-5659-0746; e-mail: irhas@rambler.ru

КАРПОВ Алексей Васильевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Московская область, Российская Федерация; РИНЦ ID: 338983; ResearcherID: L-7707-2015; ORCID: 0000-0002-0187-3159; e-mail: avkhome@inbox.ru

ЛОБОВА Софья Федоровна, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7200-599x; e-mail: sophyf@mail.ru

ПЕТРОВА Наталья Вячеславовна, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2448-6736; e-mail: n-youn@mail.ru

Information about the authors

Irek R. KHASANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashiha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 157014; ResearcherID: T-4177-2017; ORCID: 0000-0002-5659-0746; e-mail: irhas@rambler.ru

Alexey V. KARPOV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashiha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 338983; ResearcherID: L-7707-2015; ORCID: 0000-0002-0187-3159; e-mail: avkhome@inbox.ru

Sofia F. LOBOVA, Senior Researcher, Research Institute for Advanced Research and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7200-599x; e-mail: sophyf@mail.ru

Natalia V. PETROVA, Senior Researcher, Research Institute for Advanced Research and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2448-6736; e-mail: n-youn@mail.ru

Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения

© М.В. Алешков , Д.А. Иощенко, И.А. Ольховский

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Пожары электроустановок под напряжением являются наиболее опасными и сложными с точки зрения их ликвидации. При тушении таких пожаров существует большая опасность поражения электрическим током личного состава пожарно-спасательных подразделений. В последнее время электроустановки приобрели новый вектор внедрения — электромобили. Конструкция электромобилей предусматривает использование аккумуляторных батарей большой емкости и наличие электрооборудования под высоким напряжением, что представляет повышенную пожарную опасность. Целью статьи является анализ потенциальных объектов защиты и оценка существующих методов ликвидации пожаров электрооборудования для обоснования основных направлений исследований по созданию безопасных средств пожаротушения электроустановок автотранспортных средств.

Основная (аналитическая) часть. Объекты с электроустановками, тушение которых необходимо производить без отключения электроэнергии, находятся в распоряжении тех пожарных частей, личный состав которых имеет соответствующую подготовку и оборудование. Однако в случае возгорания электромобилей невозможно спрогнозировать, в районе какой пожарной части это произойдет и насколько она будет оснащена соответствующим оборудованием. Рассмотренные конструктивные особенности электромобилей показывают, что потенциальными источниками пожарной опасности, представляющими проблему при ликвидации очагов горения, являются литийсодержащие аккумуляторные батареи и токоведущие элементы цепи. Данные условия обуславливают необходимость рассмотрения проблемы организации пожаротушения автономных электроустановок автотранспортных средств с точки зрения электробезопасности. Предлагается на основе анализа основных способов пожаротушения определить способ тушения, предусматривающий создание средств оперативного пожаротушения, обеспечивающий безопасное проведение пожаротушения электроустановок автотранспортных средств.

Выводы. В качестве основного средства, исключающего возможность утечки тока по струе огнетушащего вещества, для тушения различных видов электроустановок, располагающихся, в том числе, на базе автотранспортных средств, целесообразно использовать импульсную подачу огнетушащего вещества. При решении данной задачи не рассматривались возможные эффекты экзотермических реакций с литийсодержащими элементами. На основании проведенных исследований будет сформирована концепция технических решений для комплектования оперативных пожарных и аварийно-спасательных формирований для тушения пожаров с участием электромобилей.

Ключевые слова: пожар электроустановок; утечка тока по струе; импульсная подача огнетушащего вещества; метод тушения; пожар электромобилей

Для цитирования: Алешков М.В., Иощенко Д.А., Ольховский И.А. Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 51–59. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.51-59

 Алешков Михаил Владимирович, aleshkov.m@mail.ru

Various electrical fires and firefighting methods

© Mikhail V. Aleshkov , Dmitry A. Ioshchenko, Ivan A. Olkhovsky

Academy of State Fire Service of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fires of voltage-carrying electrical units are most dangerous and difficult to put out. Personnel of fire emergency response units are at high risk of electric shock when extinguishing such fires. Electrical units have recently obtained a new are of application, that is, electric cars. Electric car design entails the use of high-capacity batteries and high voltage electrical equipment, which pose a higher fire hazard. The objective of this article is to analyze potential assets to be protected and assess existing electrical fire extinguishing methods to substantiate principal areas of research into design of safe fire extinguishing systems designated for electrical units installed on motor vehicles.

Main (Analytical) part. The fire extinguishing of the items, that have electrical units to be extinguished without any electricity outage, must be performed by the fire departments that have appropriately trained and equipped personnel. However, in the event of an electric car fire, it is impossible to forecast which fire department will be nearby and how well it will be equipped. The design features of electric vehicles show that potential sources of the fire hazard include lithium batteries and electrical circuit elements. These factors explain the need to consider the problem of extinguishing self-contained electrical fires inside motor vehicles from the standpoint of electrical safety. It is suggested to identify the fire extinguishing method in furtherance of the analysis of a set of principal fire extinguishing methods with regard for the design of efficient firefighting appliances that ensure safe extinguishing of electric car fires.

Conclusions. It is expedient to use the pulse application of a fire-extinguishing agent that prevents current leakage while extinguishing various types of electrical appliances, including those installed on motor vehicles. The effects of exothermic reactions, involving lithium-containing elements, were not analyzed when solving this problem. This research will serve as the basis for conceptual technological solutions designated for fire emergency response units responsible for extinguishing electric car fires.

Keywords: electrical fire; current leakage in a jet; pulse application of a fire-extinguishing agent; fire extinguishing method; electric car fire

For citation: Aleshkov M.V., Ioshchenko D.A., Olkhovsky I.A. Various electrical fires and firefighting methods. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):51-59. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05. 51-59 (rus.).

✉ Mikhail Vladimirovich Aleshkov, e-mail: aleshkov.m@mail.ru

Введение

Анализ статистики пожаров на территории Российской Федерации позволяет сделать вывод, что по причине нарушения правил эксплуатации устройства и электрооборудования происходит каждый четвертый пожар [1].

Пожары электроустановок под напряжением являются наиболее опасными и сложными с точки зрения их ликвидации. При тушении таких пожаров существует большая опасность поражения электрическим током личного состава пожарно-спасательных подразделений [2].

В последнее время электроустановки приобрели новый вектор внедрения — электромобили. Существующие электромобили с автономными источниками электроэнергии, работающими по принципу получения электроэнергии, можно разделить на три типа: комбинированные двигательные установки, получение электроэнергии от внешних сетей, генерация электроэнергии в топливных ячейках с использованием водорода. При всем разнообразии указанных конструкций их объединяет способ накопления и реализации электроэнергии — с помощью аккумуляторной батареи и электродвигателей. Использование аккумуляторных батарей большой емкости и наличие электрооборудования под высоким напряжением представляет повышенную пожарную опасность, что обуславливает необходимость предусмотреть средства пожаротушения, обеспечивающие эффективность и безопасность в случае аварийной ситуации.

Мировой спрос на электромобили растет с каждым годом. Основной причиной увеличения этого спроса является экономия затрат на топливо и содержание транспортного средства. Некоторые государства поддерживают развитие электромоби-

лей, обеспечивая их владельцам привилегии в виде освобождения от налогов, бесплатных парковок и т.д. Государство же, в свою очередь, делает ставку на высокую экологичность, которая, со слов производителей электромобилей, достигается за счет отсутствия выхлопов, антифризов, масел и других нефтепродуктов, кроме того, данная техника практически бесшумна [3, 4].

Согласно данным Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg – ZSW, представленным на рис. 1, в мире по итогам 2018 г. насчитывалось более 5,6 млн электромобилей [5].

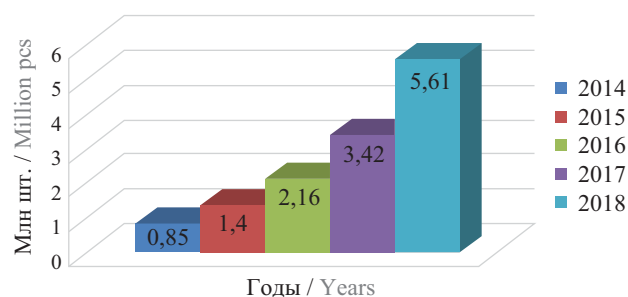


Рис. 1. Динамика увеличения количества электромобилей в мире по годам [5]

Fig. 1. Growth in the number of electric cars worldwide broken down by the years [5]

На диаграмме не представлены набирающие популярность автомобили с силовыми установками на водородном топливе, которые также относятся к электромобилям гибридного типа. Среди регионов самая большая динамика роста количества электромобилей в 2018 г. наблюдалась в Китае (54 %), на втором месте — Европа (19 %) и на третьем — США (18 %) [5].

На начало 2020 г. в Российской Федерации, по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ», насчитывается более 6,3 тыс. электромобилей [6].

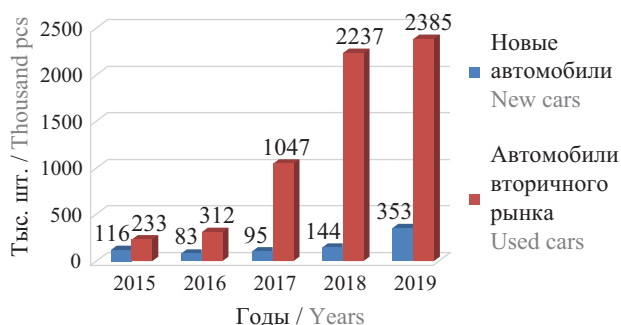


Рис. 2. Количество электромобилей в Российской Федерации за 2015–2019 гг. [6]

Fig. 2. The number of electric cars in the Russian Federation in 2015–2019 [6]

Из диаграммы, приведенной на рис. 2, наглядно видно, что в период 2015–2019 гг. среднегодовой прирост количества электромобилей вторичного рынка составляет 230 %, а новых автомобилей — 51 %.

В Российской Федерации одними из важных представителей транспортных средств на электрической тяге, не учтенных в статистике, представленной на рис. 2, являются электробусы. Сегодня на линиях общественного транспорта г. Москвы работает более 300 единиц, а к концу 2020 г. их число увеличится до 600 единиц [7–9].

Проблемой, для решения которой до сих пор в мире не накоплен опыт и не выработаны совершенные методы решения, является ликвидация пожаров транспорта на электрической тяге [10–14]. В мировых новостных источниках достаточно часто появляется информация об очередном возгорании электромобиля. Исследовательская компания Batelle произвела анализ и выяснила, что по состоянию на 2018 г. произошло более 40 возгораний только электромобилей марки Tesla [15].

Из проведенного анализа следует, что пожаротушение тяговых автономных электроустановок на автомобилях представляет серьезную проблему как в части выбора технических средств, так и тактических способов пожаротушения. Задача выбора способа тушения электроустановок автомобилей усугубляется тем, что необходимо рассматривать двоякую задачу: обеспечить эффективное тушение аккумуляторных батарей с литием и исключить возможность электрического пробоя от высоковольтных токоведущих элементов электроустановки при подаче огнетушащих средств в очаг пожара. Целью настоящих исследований является выбор эффективных способов тушения электроустано-

вок автотранспортных средств, находящихся под напряжением, при условии обеспечения электробезопасности.

Основная (аналитическая) часть

Как правило, объекты с электроустановками, тушение которых необходимо производить без отключения электроэнергии, находятся в распоряжении тех пожарных частей, личный состав которых имеет соответствующую подготовку и оборудование. Однако в случае возгорания электромобиля невозможно спрогнозировать, в районе какой пожарной части это произойдет и насколько она будет оснащена соответствующим оборудованием. В то же время в современном мире набирают популярность электромобили, электрокары и гибридные автомобили, напряжение тока в системах электропитания которых составляет 380–400 В, при силе тока свыше 200 А. Необходимо отметить, что ощутимым для человека является ток силой не более 0,5 мА.

Пожары электромобилей можно вывести в отдельное направление на общем фоне пожаров. В связи с этим при тушении такого вида пожаров для оператора, проводящего тушение, возможно развитие самых неблагоприятных сценариев: взрыв, поражение электрическим током, выделение высокотоксичных ядов и т.д. [16].

Главным источником пожара в электромобиле является батарея высокого напряжения (рис. 3) и токоведущие элементы цепи, находящиеся под напряжением 380–400 В.

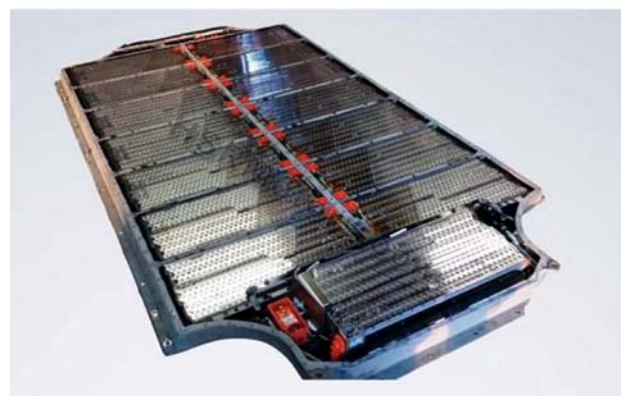


Рис. 3. Батарея электромобиля Tesla

Fig. 3. Tesla electric car battery

Причины пожаров электрокаров по причинам возникновения можно условно разделить на две категории: в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и в результате самовозгорания.

ДТП, в результате которых происходит повреждение батареи, являются наиболее частой причиной пожаров электромобилей. Один наиболее



Рис. 4. Пожар автомобиля марки Tesla после наезда на препятствие

Fig. 4. Tesla electric car fire after running over an obstacle

яркий случай такого пожара произошел в октябре 2013 г., когда движущийся по шоссе автомобиль Tesla Model 3 наехал на деталь от прицепа, которая пробила днище и повредила батарею, что в результате спровоцировало короткое замыкание и возгорание (рис. 4).

Однако рассмотренные пожары позволяют сделать вывод, что самовозгорание электромобиля также может являться рядовой причиной.

Один из последних пожаров по причине самовозгорания произошел 21 апреля 2019 г. в г. Шанхае. Автомобиль Tesla Model S, стоявший на паркинге, начал выделять дым, а затем взорвался, что привело к распространению пламени на рядом стоящие автомобили (рис. 5).

Исследование вопросов эффективного пожаротушения электромобилей является приоритетной

задачей научно-исследовательских подразделений в данной области. Сегодня некоторые страны уже имеют практический опыт тушения пожаров электромобилей. Так, например, в Швейцарии при прибытии на место вызова и обнаружении электромобиля для поддержки привлекаются две единицы основной техники, которые должны обеспечить снижение температуры горящей батареи за счет подачи большого количества воды, чтобы не позволить пламени распространиться на другие ячейки аккумулятора.

Пожарные Нидерландов разделяют точку зрения компании Tesla, которая заключается в том, что для полного тушения горящий электромобиль необходимо поместить в емкость, содержащую не менее 18 м³ воды, и выдержать карантин автомобиля не менее 48 ч.



Рис. 5. Самовозгорание Tesla Model S в г. Шанхай

Fig. 5. Tesla Model S self-ignition in Shanghai

Основное внимание в организации процесса тушения в приведенных случаях направлено на ликвидацию горения литиевых батарей, оставляя без должного внимания вопросы электробезопасности.

В настоящее время наиболее полно вопрос электробезопасности электромобилей рассматривается в руководстве NFPA (США) по тушению транспорта на электрической или гибридной тяге, выпущенном в 2018 г. [17]. В нем приводится порядок проведения работ по ликвидации пожара электромобиля, который определяет действия, начиная с идентификации до процесса тушения. Особое внимание отводится процедуре обеспечения электробезопасности, называемой в данном документе «Отключение». Процедура «Отключение» заключается в выключении зажигания и размыкании цепи аккумуляторной батареи.

В данном документе [17] приводится устройство всех электромобилей по отдельности для изучения порядка размыкания цепи высокого напряжения, которое составляет 400 В.

Непосредственно само тушение NFPA предлагает проводить водой, которой должно быть не менее 11 тыс. л. Данные требования подтверждаются проведенными экспериментами.

Устройство электромобилей, приведенное NFPA, может дать только общее представление, но не конкретное расположение токоведущих магистралей. Причин данного обстоятельства две:

- частые изменения и рейстайлинг базовых моделей автопроизводителями;
- изменения конструкции электромобилей вторичного рынка, которые могли произойти в результате непрофессионального обслуживания.

Следовательно, в момент пожара оперативно актуализировать информацию о расположении токоведущих магистралей невозможно. Неверно проведенные работы по отключению электропитания могут стать причиной поражения участников тушения пожара электрическим током. Даже отключив электропитание автомобиля, мы всего лишь убираем напряжение с некоторых потребителей, но сама батарея продолжает оставаться под напряжением [18, 19].

Основной угрозой для участников тушения пожара электромобиля является прохождение электрического тока критической величины по огнетушащей струе различного состава и поражение им ствольщика и оборудования средства тушения пожара.

Тушение пожаров электрооборудования под напряжением всегда было одним из важнейших вопросов в области пожаротушения, изучению которого посвящены труды многих ученых: А.К. Микеева, М.В. Алешкова, А.А. Колбасина, В.Д. Федяева, И.А. Гусева [20, 21]. Однако в своих работах они рассматривали средства тушения пожаров электрооборудования под напряжением, которые имели непрерывную струю огнетушащих веществ (ОТВ), и при использовании различных ОТВ возникал ток утечки (рис. 6), в связи с чем определялись безопас-

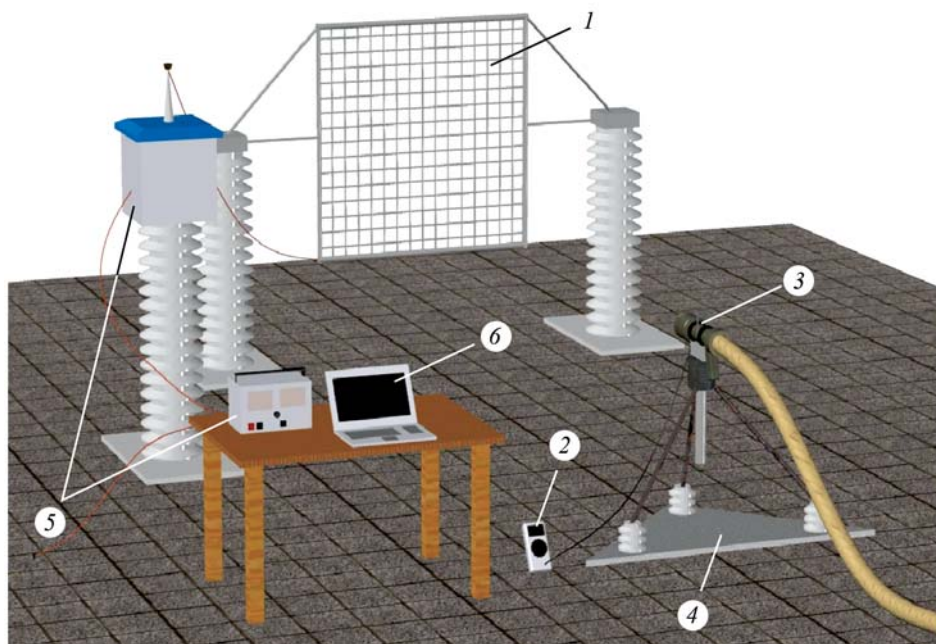


Рис. 6. Эксперимент по определению тока утечки по струе ОТВ [26]: 1 — мишень; 2 — мультиметр; 3 — испытуемое устройство; 4 — изолирующая подставка; 5 — аппарат испытания диэлектриков АИД-70М; 6 — компьютер для приема данных

Fig. 6. An experiment to identify leakage current using a stream of the firefighting agent [26]: 1 — target; 2 — multimeter; 3 — device under test; 4 — insulating stand; 5 — AID-70M dielectric testing device; 6 — data receiving computer



Рис. 7. Импульсная подача ОТВ

Fig. 7. Pulse application of the firefighting agent

ные условия применения рассматриваемых систем и средств пожаротушения, соблюдение которых в условиях пожара крайне затруднительно.

Для тушения электроустановок, находящихся под напряжением, предлагается использование систем пожаротушения, особенностью которых является импульсная подача ОТВ (рис. 7). Она позволит обеспечить пожаротушение с учетом защиты участников тушения пожара и оборудования от воздействия электрического тока. Данная технология исключает из электрической цепи «источник электрического тока – ствольщик» основной ее проводник — неразрывную струю различных ОТВ.

Выводы

В статье предлагается определить способ тушения и разработать требования по созданию средств оперативного пожаротушения, обеспечи-

вающих эффективное тушение основного очага горения — литиевой батареи, при условии исключения возможности поражения личного состава и техники электрическим током.

В качестве основного принципа обеспечения электробезопасности рассматривается прерывистость и интенсивность подачи огнетушащего средства в очаг горения. Оптимизация этих параметров должна позволить обеспечить требования электробезопасности и условия охлаждения и тушения аккумуляторных батарей с учетом эффекта возможных экзотермических реакций с литийсодержащими элементами.

На основании проведенного исследования будет сформирована концепция технических решений для комплектования оперативных пожарных и аварийно-спасательных формирований при тушении пожаров с различных видов электроустановок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешков М.В., Иощенко Д.А., Колбасин А.А. Импульсная подача огнетушащего вещества для ликвидации пожаров электрооборудования под напряжением // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 70–74. DOI: 10.25257/FE.2019.1.70–74
2. Алешков М.В., Колбасин А.А. Особенности развития и тушения пожаров, возникающих по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 54–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356460>

3. Electric vehicles are good for people and the environment // SLO CLIMATE COALITION. 2019. URL: <https://carbonfreeslo.org/electric-vehicles-are-good-for-people-and-the-environment/> (дата обращения 01.06.2020)
4. Горбунова А.Д., Ахметзянов Д.Д. Развитие электромобилей в мире как метод повышения экологической среды // Поколение будущего: взгляд молодых ученых-2018 : сб. науч. ст. 7-й Междунар. мол. науч. конф. Курск, 13–14 ноября 2018 г. : в 4-х т. Том 4. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 15–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36764929>
5. Global E-car count up from 3.4 to 5.6 million // Zentrum für Sonnenenergieund Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. 2019. URL: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2019/pr02-2019-ZSW-WorldwideNumbersElectriccars.pdf (дата обращения 18.02.2020)
6. Тимерханов А. В России зарегистрировано 6,3 тыс. электромобилей // Аналитическое агентство Автостат. 2020. URL: <https://www.autostat.ru/news/42999/> (дата обращения 03.03.2020).
7. Количество электробусов в Москве увеличится до 600 к концу 2020 года // Москва.ру. 2019. URL: <https://moskva.ru/2019/12/09/83390.html> (дата обращения 27.02.2020)
8. Бычков В.П., Прядкин В.И., Романов В.В. Основные проблемы применения городского электробуса // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 79–82. DOI: 10.12737/13854
9. The impact of electric buses on urban life // Union Internationale des Transports Publics, UITP. 2019. URL: <https://www.uitp.org/publications/the-impact-of-electric-buses-on-urban-life/> (дата обращения 04.06.2020)
10. Колчин В.В., Крутоланов А.С. Пожарная безопасность электромобилей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 417–419. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36576214>
11. Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles // RISE Research Institutes of Sweden. 2019. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1317419/FULLTEXT02> (дата обращения 02.06.2020)
12. Nitta N., Wu F., Lee T., Yushin G. Li-Ion battery materials: present and future // Materials Today. 2015. Vol. 18. Pp. 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
13. International Energy Agency / Global EV Outlook 2018 / International Energy Agency. 2018.
14. European Alternative Fuels Observatory / Total Number Alternative Fuels Passenger Cars: AF Fleet (Electricity) (2019). 2018. URL: <https://tinyurl.com/y9g45w6p> (дата обращения 04.02.2020).
15. Lebkowski A. Electric vehicle fire extinguishing system // Przegląd Elektrotechniczny. 2017. Vol. 93. Pp. 329–332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
16. Раздувание огня: все ли электромобили пожароопасны // Известия. 2019. URL: <https://iz.ru/871987/evgenii-bagdasarov/razduvanie-ognia-vse-li-elektromobili-pozharoопасny> (дата обращения 16.04.2020).
17. Ляшенко С.М., Блохин А.А. Пожарная безопасность электроавтомобилей как элемент системы пожарной безопасности автотранспорта и пути ее совершенствования // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году культуры безопасности. Иваново, 19 сентября 2018 г. Часть II. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. С. 48–51. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307907>
18. Emergency Field Guide 2018 Edition // NFPA. 2018.
19. Гулямов К.Х. Проблемы электробезопасности при эксплуатации электромобилей с высоковольтным источником энергии // Наука России: цели и задачи : сб. науч. тр., по мат. III междунар. науч.-практ. конф. 10 июня 2017 г. Часть 2. Екатеринбург : Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2017. С. 17–18. DOI: 10.18411/sr-10-06-2017-16
20. Ендачев Д.В., Шорин А.А., Карпучин К.Е. Электрическая безопасность автомобилей с комбинированной энергоустановкой и электромобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 6 (101). С. 58–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29309913>
21. Алешков М.В., Емельянов Р.А., Колбасин А.А., Федяев В.Д. Обзор применения технологии подачи компрессионной пены при тушении пожаров электрооборудования под напряжением // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 58–63. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-4/41-04-15.ttb.pdf>

22. Алешков М.В., Рожков А.В., Двоенко О.В., Ольховский И.А., Гусев И.А. Применение робототехнических комплексов для тушения пожаров на объектах энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 1. С. 48–53. DOI: 10.25257/FE.2016.1.48-53

REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Ioshchenko D.A., Kolbasin A.A. Impulse discharge of extinguishing medium to suppress fires of live electrical equipment. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2019; 1:70-74. DOI: 10.25257/FE.2019.1.70-74 (rus.).
2. Aleshkov M.V., Kolbasin A.A. Features of development and suppression of fires emerging due to the violation of electrical installation and operation rules. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2010; 3:54-57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356460> (rus.).
3. Electric vehicles are good for people and the environment. *SLO CLIMATE COALITION*. 2019. URL: <https://carbonfreeslo.org/electric-vehicles-are-good-for-people-and-the-environment/>
4. Gorbunova A.D., Akhmetzyanov D.D. The development of electric vehicles in the world as a method of increasing the ecological environment. *Generation of the future: the look of young scientists — 2018 : collection of scientific articles of the 7th International Youth Scientific Conference : in 4 vol. Vol. 4*. Kursk, JSC University Book, 2018; 15-17. (rus.).
5. Global E-car Count Up from 3.4 to 5.6 Million. *Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg*. 2019. URL: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemittelungen/2019/pr02-2019-ZSW-WorldwideNumbersElectriccars.pdf
6. Timerkhanov A. 6.3 thousand electric vehicles registered in Russia. *Analiticheskoye agentstvo Avtostat / Analytical Agency Avtostat*. 2020. URL: <https://www.autostat.ru/news/42999> (rus.).
7. The number of electric buses in Moscow will increase to 600 by the end of 2020. *Moskva.ru*. 2019. URL: <https://moskva.ru/2019/12/09/83390.html>
8. Bychkov V.P., Pryadkin V.I., Romanov V.V. Main problems of urban elektrobus application. *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use*. 2015; 2(1):79-82. DOI: 10.12737/13854 (rus.).
9. The impact of electric buses on urban life. *Union Internationale des Transports Publics, UITP*. 2019. URL: https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP-policy-brief-June2019-V6%20WEB%20-%20OK_0.pdf
10. Kolchin V.V., Krutolapov A.S. Fire safety electric vehicles. *Fire safety: problems and prospects*. 2018; 1(9):417-419. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36576214> (rus.).
11. Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles. *RISE Research Institutes of Sweden*. 2019. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1317419/FULLTEXT02>
12. Nitta N., Wu F., Lee T., Yushin G. Li-Ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015; 18:252-264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
13. International Energy Agency / Global EV Outlook 2018 / International Energy Agency. 2018.
14. European alternative fuels observatory. *Total Number Alternative Fuels Passenger Cars: AF Fleet (Electricity) (2019)*. 2018. URL: <https://tinyurl.com/y9g45w6p>.
15. Lebkowski A. Electric vehicle fire extinguishing system. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017; 93:329-332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
16. Fanning: are all electric cars fire hazardous. *Izvestiya/News*. 2019. URL: <https://iz.ru/871987/evgenii-bagdasarov/razduvanie-ognia-vse-li-elektromobili-pozharoopasny>
17. Lyashenko S.M., Blokhin A.A. Fire safety of electric vehicles as a element of fire safety system of motor transport and ways of its improvement. *Modern Fireproof Materials and Technologies : collection of materials of the international scientific-practical conference dedicated to the Year of Safety Culture*. 2018; 48-51. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42307907> (rus.).
18. Emergency field guide 2018 edition. *NFPA*. 2018.
19. Gulyamov K.Kh. Electrical safety problems in the operation of electric vehicles with a high voltage energy source. *Science of Russia: goals and objectives : collection of scientific papers, based on the materials of the III International Scientific and Practical Conference June 10, 2017, Part 2. Yekaterinburg : Publishing House of Research Center "L-Journal", 2017; 17-18. DOI: 10.18411/sr-10-06-2017-16 (rus.).*

20. Yendachev D.V., Shorin A.A., Karpukhin K.Ye. The electrical safety of hybrid and electric vehicles. *Zurnal AAI*. 2016; 6(101):58-63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29309913> (rus.).
21. Aleshkov M.V., Yemelyanov R.A., Kolbasin A.A., Fedyayev V.D. Review of application of technology of supply of compression foam during extinguishing fires electric equipment under voltage. *Technology of Technosphere Safety*. 2015; 4(62):58-63. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-4/41-04-15.ttb.pdf> (rus.).
22. Aleshkov M.V., Rozhkov A.V., Dvoyenko O.V., Olkhovskiy I.A., Gusev I.A. The use of robotic systems for extinguishing fires at energy facilities. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2016; 1:48-53. DOI: 10.25257/FE.2016.1.48-53 (rus.).

Поступила 02.06.2020, после доработки 22.07.2020;

принята к публикации 09.10.2020

Received June 2, 2020; Received in revised form July 22, 2020;

Accepted October 9, 2020

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 257856, ORCID 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

ИОЩЕНКО Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

ОЛЬХОВСКИЙ Иван Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной техники, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 771909, ORCID 0000-0002-7561-2517; e-mail: 250615m@mail.ru

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Deputy Head, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia; Moscow, Russian Federation; ID RISC: 257856, ORCID 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

Dmitry A. IOSHCENKO, Senior Researcher, Research Department of Fire and Rescue Equipment, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia; Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

Ivan A. OLKHOVSKY, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Fire Engineering, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia; Moscow, Russian Federation; ID RISC: 771909, ORCID 0000-0002-7561-2517; e-mail: 250615m@mail.ru

Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии

© М.Ю. Умрихина¹, Т.О. Шорохова¹ ✉, Л.А. Пьянкова², А.А. Кудрявцев³, С.В. Уткин¹

¹ Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу (Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Пеньковская, 6)

² АО «Научные приборы» (Россия, 190103, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, 52)

³ ООО «ТЕСКАН» (Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 11)

АННОТАЦИЯ

Введение. Огнезащита металлических конструкций является одной из актуальных проблем повышения огнестойкости сооружений, для чего в настоящее время применяются огнезащитные вспучивающиеся материалы, которые имеют ограниченный срок службы.

Цели и задачи. С целью анализа изменений, происходящих в компонентном составе огнезащитных вспучивающихся покрытий на базе полифосфата аммония – меламина – пентаэритрита, проведено комплексное исследование образцов покрытия отечественного производства, искусственно подверженных климатическому старению (3, 6 и 9 лет).

Методы. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии изучены внешний вид, морфология включений и микроструктура поверхности образцов покрытия. Проведено исследование фазового и структурного состояния методами рентгенодифракционного анализа и ИК-спектроскопии, а также измерение коэффициента вспучивания огнезащитного покрытия.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что коэффициент вспучивания образцов значительно уменьшается с увеличением времени эксплуатации покрытия и уже при достижении 30 % ресурса приводит к снижению предела огнестойкости защищаемой конструкции. В результате старения образцов происходит постепенное изменение их фазового состава, вызванное уменьшением содержания меламина на 40 %, полифосфата аммония на 15 %, а также перераспределением других компонентов в системе, в результате чего меняются микроструктура покрытия и его защитные свойства.

Выводы. В процессе эксплуатации огнезащитного покрытия под действием внешних факторов происходят изменения, влияющие на способность покрытия сохранять заявленные производителем показатели огнезащитной эффективности. Обнаруженные в результате данного исследования закономерности можно применять для изучения образцов, изъятых с объектов защиты, с целью выявления отклонений от исходного состояния покрытия и прогнозирования его действительного срока службы.

Ключевые слова: коэффициент вспучивания; огнезащитная эффективность; структура покрытия; компонентный состав; срок эксплуатации

Для цитирования: Умрихина М.Ю., Шорохова Т.О., Пьянкова Л.А., Кудрявцев А.А., Уткин С.В. Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 60–70. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.60-70

✉ Шорохова Татьяна Олеговна, e-mail: tanya_ipi_spb@mail.ru

Using scanning electron microscopy, x-ray diffraction and IR spectroscopy to study the ageing of intumescent fire-proof coatings

© Marina Yu. Umrikhina¹, Tatyana O. Shorokhova¹ ✉, Lyubov A. Pyankova², Andrey A. Kudryavtsev³, Sergey V. Utkin¹

¹ Testing Fire Laboratory on Saint Petersburg (Penkovaya St., 6, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation)

² Scientific Instruments JSC (st. Marshal Govorov, 26, Saint Petersburg, 190103, Russian Federation)

³ TESCAN Ltd. (Grazhdanskiy Avenue, 11, Saint Petersburg, 195220, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The fire protection of metal structures is a relevant present-day problem; its solution implies better fire resistance performance of structures attainable through the application of intumescent fire-proof coatings whose service life expectancy is limited.

Goals and objectives. Comprehensive studies of domestically made coating samples were performed to analyze the changes in the chemical composition of intumescent coatings containing ammonium polyphosphate, melamine, and pentaerythritol. The samples were exposed to artificial climatic ageing (3, 6, and 9 years).

Methods. Optical and scanning electron microscopies were used to study the appearance of samples, the morphology of inclusions and the surface microstructure. X-ray diffraction and IR spectroscopy were employed to study the phase and structural states of samples, and the swelling ratio of fire-proof coatings was also examined.

Results and discussion. It's been found out that the swelling ratio of samples goes down to a significant extent as the time progresses, and when the residual life of a coating reaches 30 %, the fire resistance limit of the structure goes down. Sample ageing is the reason for gradual phase composition changes due to the melamine content reduction by 40 %, ammonium polyphosphate content reduction by 15 % and redistribution of other components that change the microstructure of coatings, as well as their fire retarding properties.

Conclusions. The changes, influencing the ability of a coating to maintain its fire retarding efficiency as declared by the manufacturer, take place in the course of operation of a coating exposed to external factors. The regularities, identified by virtue of this research, can be used to study the samples taken at fire-proofed facilities to identify deviations from the initial condition of a coating and to forecast its actual service life.

Keywords: swelling ratio; fire-proof efficiency; coating structure; composition; service life

For citation: Umrikhina M.Yu., Shorokhova T.O., Pyankova L.A., Kudryavtsev A.A., Utkin S.V. Using scanning electron microscopy, x-ray diffraction and IR spectroscopy to study the ageing of intumescent fire-proof coatings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):60-70. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.60-70 (rus.).

✉ Tatyana Olegovna Shorokhova, e-mail: tanya_ipi_spb@mail.ru

Введение

Применение на объектах огнезащитного вспучивающегося покрытия (ОВП) в современной практике является распространенным способом защиты металлических конструкций от прогрева и разрушения в процессе пожара. В связи с этим образцы данных покрытий служат объектом всестороннего исследования, поскольку гарантийный срок службы ОВП в условиях эксплуатации напрямую связан со сроком эксплуатации самих зданий и сооружений. Одной из важных характеристик огнезащитного вспучивающегося покрытия является его теплоизолирующая способность, которая заключается в способности огнезащитного состава подвергаться расширению под воздействием тепла и препятствовать распространению тепловых факторов в условиях высоких температур.

Согласно [1–7], фосфо- и азотсодержащие вещества являются одними из основных компонентов, ингибирующих процесс горения. Введение в состав подобного рода вспенивающих добавок останавливает горение покрытия на начальных этапах возгорания, т.е. на стадии, характеризующейся наибольшим выделением горючих газообразных продуктов и интенсивным дымообразованием, когда формируется вспененный ячеистый коксовый слой [8–17]. Данный слой, плотность которого уменьшается с ростом температуры, предохраняет горящий материал от воздействия теплового потока или пламени [1]. На образование вспененного ячеистого слоя, способного выполнять свои огнезащитные функции, влияет ряд факторов, в том числе условия нанесения покрытия, подготовка поверхности к нанесению покрытия, влияние атмосферных условий и срока эксплуатации.

В соответствии с результатами работы [18], долговечность и сроки службы огнезащитных покрытий в процессе эксплуатации связаны с физико-химическими и биохимическими процессами, сопровождающимися потерей технологических, прочностных и эксплуатационных характеристик, химическими, биохимическими, фотохимическими и физико-химическими процессами — с потерей огнезащитных характеристик, а также процессами на границе покрытие – подложка — с потерей адгезионных характеристик. Конечный срок службы покрытия будет определяться теми процессами, скорость и интенсивность которых преобладает.

В связи с тем, что сроки эксплуатации строительных конструкций исчисляются десятками лет, возникает вопрос сохранения эффекта огнезащиты покрытий в процессе длительной эксплуатации [16, 17]. Анализ литературы показал, что в рекламных материалах часто указывают завышенные сроки службы огнезащитных покрытий [18–19].

Ранее авторами данной работы проводилось исследование четырех ОВП на основе полифосфата аммония – пентаэритрита – меламина на предмет оценки долговечности покрытий, в котором изучались изменения, происходящие с покрытиями при их эксплуатации, т.е. при старении и температурном воздействии [20]. Было обнаружено, что при увеличении возраста старения этих ОВП происходит не только внешнее изменение поверхности покрытий, но и уменьшение коэффициента вспучивания, а также изменение кристаллического фазового состава покрытий.

Целью данной работы является более детальное исследование изменений компонентного и элементного составов ОВП и микроструктурных характеристик, происходящих в процессе эксплуатации

отечественного огнезащитного вспучивающегося покрытия, используемого для защиты металлических конструкций, с заявленным производителями периодом эксплуатации до 15 лет. Результаты данной работы могут стать основой для разработки оценки продолжительности сохранения покрытием огнезащитной эффективности, что напрямую связано с предупреждением возникновения чрезвычайных ситуаций во время пожара.

В настоящий момент действует система национальных стандартов, предъявляющих требования к эксплуатационным характеристикам и методам испытаний по определению свойств и характеристик лакокрасочных материалов, в том числе требования и методы ускоренных климатических испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. При этом требования стандартов распространяются на лакокрасочные материалы общего назначения и не могут быть применены для испытаний ОВП.

Отсутствие единого методологического подхода в системе стандартизации Российской Федерации к определению эксплуатационных свойств и требований к определению изменений значений огнезащитной эффективности при воздействии климатических факторов, условий и сроков эксплуатации ОВП создает серьезный пробел, позволяющий недобросовестным производителям огнезащитных материалов указывать в технической документации необоснованные эксплуатационные характеристики на выпускаемую продукцию. Отсутствие стандартизированного подхода к определению свойств и методов испытаний ОВП на различных стадиях жизненного цикла создаваемого покрытия приводит не только к значительным финансовым рискам при создании систем пожарной безопасности объектов защиты, но и создает условия к прямому материальному ущербу, травмированию и гибели людей в случае возникновения пожара.

Материалы и методы

Исследуемые образцы огнезащитного вспучивающегося покрытия были предварительно подвержены воздействию климатических факторов (искусственное старение — 3, 6 и 9 лет в климатических камерах по ГОСТ 9.401–91¹, метод 15). Также проведено исследование исходного образца, не подверженного климатическим факторам (далее — несостаренный образец). Согласно техниче-

¹ ГОСТ 9.401–91. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29 марта 1991 г. № 335.

ской документации на состав, основа краски — органическая, цвет покрытия — белый матовый, сухой остаток составляет 66,5...73,5 %, расход краски — 1,74 кг/м², значение адгезии — 2, срок эксплуатации — 15 лет. Исходный образец представляет собой густую вязкую жидкость белого цвета.

Образцы для анализа получены путем нанесения состава с помощью кисти на металлическую подложку, предварительно обработанную согласно ГОСТ 8832–76², и высушивания до получения твердого сухого слоя покрытия при нормальных условиях.

Определение коэффициента вспучивания проводилось на окрашенных составом стальных пластинах марки Ст3 (размером 140 × 80 × 0,9 мм), высушенных в естественных условиях и нагретых до температуры выше 500 °С. Измерялось время, за которое необогреваемая сторона нагреется до 500 °С, и с помощью штангенциркуля измерялась величина вспучивания образца. Значение коэффициента вспучивания рассчитывалось по результатам трех параллельных испытаний как отношение толщины вспученного слоя к исходной толщине покрытия согласно методике [21].

Исследование рельефа поверхности, морфологии включений, а также изучение локального элементного состава фаз в образцах выполнялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN LYRA3 XMH (производства фирмы TESCAN, Чехия) с электронно-оптической системой на основе катода с полевой эмиссией типа Шоттки. Для определения локального состава включений и построения элементных карт на основе анализа сигнала характеристического рентгеновского излучения использовался энергодисперсионный детектор (ЭДС) Ultime MAX 100 (производства фирмы Oxford Instruments, Великобритания) с энергетическим разрешением 127 эВ и активной площадью рабочего кристалла 100 мм². Дополнительная пробоподготовка образца осуществлялась путем напыления тонкого слоя углерода (толщиной около 15 нм) в установке Q150TES (производства фирмы Quorum Technologies, Великобритания) методом термического испарения углеродной нити с целью обеспечить электропроводность поверхностного слоя образцов. Микроанализы на СЭМ и ЭДС проводились при ускоряющем напряжении первичных электронов 10 кВ, токе электронного зонда в диапазоне от 100 пА до 1 нА и в рабочей камере СЭМ при вакууме 5·10⁻³ Па. Все зарегистрирован-

² ГОСТ 8832–76. Материалы лакокрасочные. Методы получения лакокрасочного покрытия для испытания: утвержден Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 21 января 1976 г. № 167, введен в действие 1 января 1977 г.

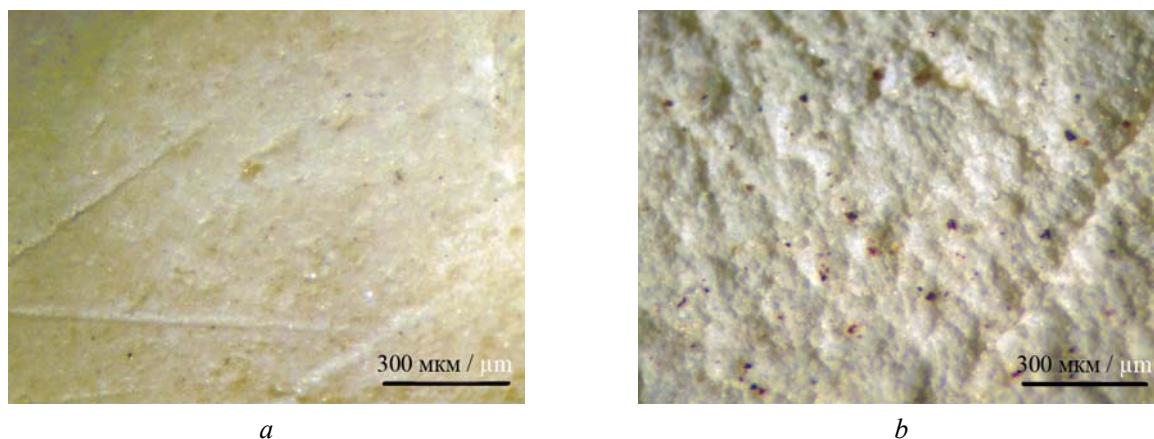


Рис. 1. Вид исходного (а) и состаренного на 9 лет (b) образцов ОВП (увеличение 45 крат)

Fig. 1. Intumescent fire-proof coating (with the magnification factor being equal to 45): *a* — initial condition; *b* — exposed to the artificial ageing of 9 years

ные спектры характеристического рентгеновского излучения (ЭДС-спектры) обрабатывались в программном пакете AZtec Advanced.

Рентгенофазовый анализ образцов проводился на настольном дифрактометре Дифрей-401к (производства АО «Научные приборы», Россия) в рентгенооптической схеме Брегга – Брентано (острофокусная трубка БСВ-33, напряжение на трубке — 25 кВ, ток — 5 мА, хромовый анод ($\lambda = 2,29091 \text{ \AA}$), размер щели коллиматора — 0,2 мм, изогнутый позиционно-чувствительный детектор с диапазоном одновременной регистрации — 43°). Регистрация дифракционного спектра порошковых образцов (размерность частиц — 40 мкм) выполнялась в диапазоне углов 2θ от 10 до 75° с вращением образца и экспозицией 600 с. Фазовый полуколичественный анализ осуществлялся в программном комплексе Diffract, база дифракционных данных — PDF2.

ИК-спектры исследуемых образцов получены на инфракрасном фурье-спектрометре ФСМ 1201 (производства фирмы «Инфраспек», Россия) в диапазоне $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$ с разрешением $4,0 \text{ см}^{-1}$, число сканов — 4. Пробоподготовка образцов осуществлялась с использованием метода таблетирования с KBr (прессование при давлении более 550 МПа с непрерывной откачкой воздуха до 0,1 Па). Анализ спектров проводился в программном пакете Fspec 4.0.0.2.

Результаты и их обсуждение

С помощью стереоскопического микроскопа Альтами СМ0745 (СМ0745-Т) было зафиксировано, что при эксплуатации ОВП происходит внешнее изменение структуры поверхности покрытия (рис. 1). Видно, что образцы, состаренные на 9 лет, имеют более рыхлую, пористую структуру в отличие от несостаренных образцов. При этом шероховатость по-

верхности покрытий также меняется от 0,9 до 7 мкм для несостаренного и состаренного на 9 лет образцов, соответственно.

Кроме того, увеличение возраста старения на 9 лет приводит к уменьшению коэффициента вспучивания почти в два раза, при допущении его уменьшения не более чем на 30 %, согласно методике [21]. Также в [22] установлено, что при увеличении времени эксплуатации наблюдается уменьшение коэффициента вспучивания.

Параллельно с этими процессами уменьшается время прогрева необогреваемой стороны пластины с ростом срока эксплуатации ОВП более чем на 20 %, при допустимых значениях 15 %, согласно методике [23] (рис. 2). Таким образом, экспериментальные данные показали, что с увеличением периода эксплуатации на 9 лет огнезащитная эффективность исследуемого покрытия снизится настолько, что ОВП перестанет выполнять свои функции.

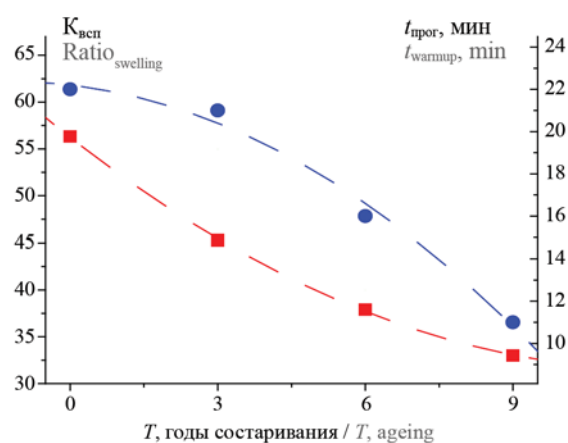


Рис. 2. Зависимость коэффициента вспучивания ($K_{\text{всп}}$) и времени прогрева пластины ($t_{\text{прогр}}$) от срока эксплуатации

Fig. 2. Dependence of the swelling ratio and the metal plate warm-up time on the time of operation

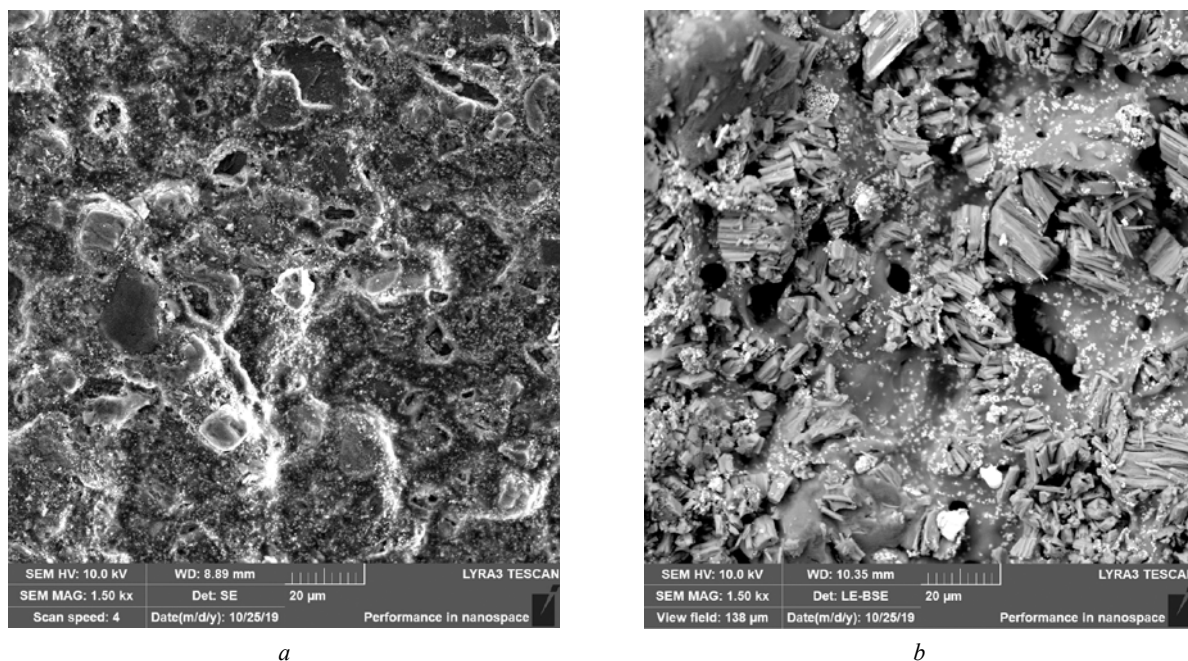


Рис. 3. Вид исходного (*a*) и состаренного на 9 лет (*b*) образцов ОВП при увеличении 1500 крат

Fig. 3. An intumescent fire-proof coating sample exposed to the 1,500x magnification: *a* — initial composition; *b* — exposed to artificial ageing (9 years)

Исследование образцов ОВП методом сканирующей электронной микроскопии с высоким пространственным разрешением (~2 нм) показало существенные отличия в морфологии поверхности состаренных и несостаренных покрытий. На рис. 3 приведен вид несостаренного и состаренного на 9 лет образцов ОВП, соответственно. Представлены топологический и композиционный контрасты поверхности покрытия на поле обзора размером 130×130 мкм, что соответствует увеличению 1500 крат.

На рис. 3, *a* видно, что поверхность несостаренного образца ОВП состоит из зерен изометрической формы размером до 10 мкм, окруженных пленкой (связующим). Общее количество зерен составляет не более 20 % от общей массы. Поверхность состаренного на 9 лет образца ОВП в основном (на 80 %) состоит из таблитчатых и столбчатых кристаллов размером до 20 мкм с несовершенной спайностью, фрагментарно окруженных пленкой-связующим, причем на некоторых участках она отсутствует.

Элементный микроанализ несостаренного и состаренного на 9 лет образцов ОВП методом ЭДС показал, что образцы отличаются и на элементном уровне (рис. 4).

Из карт распределения элементов по поверхности ОВП (см. рис. 4) видно, что в несостаренном образце ОВП всю поверхность равномерно покрывает углерод, что может свидетельствовать об однородном распределении связующего. Кислород также занимает всю поверхность образца за исключением некоторых участков в виде вкраплений разной

формы — от крупных треугольников до мелких субмикронных вкраплений, которые образует азот. Фосфор в несостаренном образце ОВП распределен равномерно и представляет собой крупные, до 10 мкм кристаллы призматического вида. Титан представлен равномерно в виде крошки размером 1...2 мкм по всей поверхности покрытия.

На состаренном образце ОВП углерод распределен менее равномерно, визуализируются крупные участки без присутствия данного элемента, а фосфор, азот и кислород однородно распределены по всей поверхности, не образуя наблюдаемых ранее вкраплений.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что в процессе старения образцов в покрытии происходят существенное перераспределение фосфо- и азотосодержащих компонентов и изменение структуры покрытия. Таким образом, можно говорить о протекании необратимых процессов в приповерхностном слое образца под действием внешних факторов.

Это подтверждают и данные, полученные методами ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа. На рис. 5 показаны спектры исходного и состаренных покрытий, из которых видно, что с возрастом спектры изменяются. В табл. 1 приведены характеристические полосы поглощения в соответствии с принадлежностью этих полос к исходным компонентам ОВП (соотнесение полос проводилось согласно [24, 25] и путем сравнения с ИК-спектрами чистых компонентов покрытия).

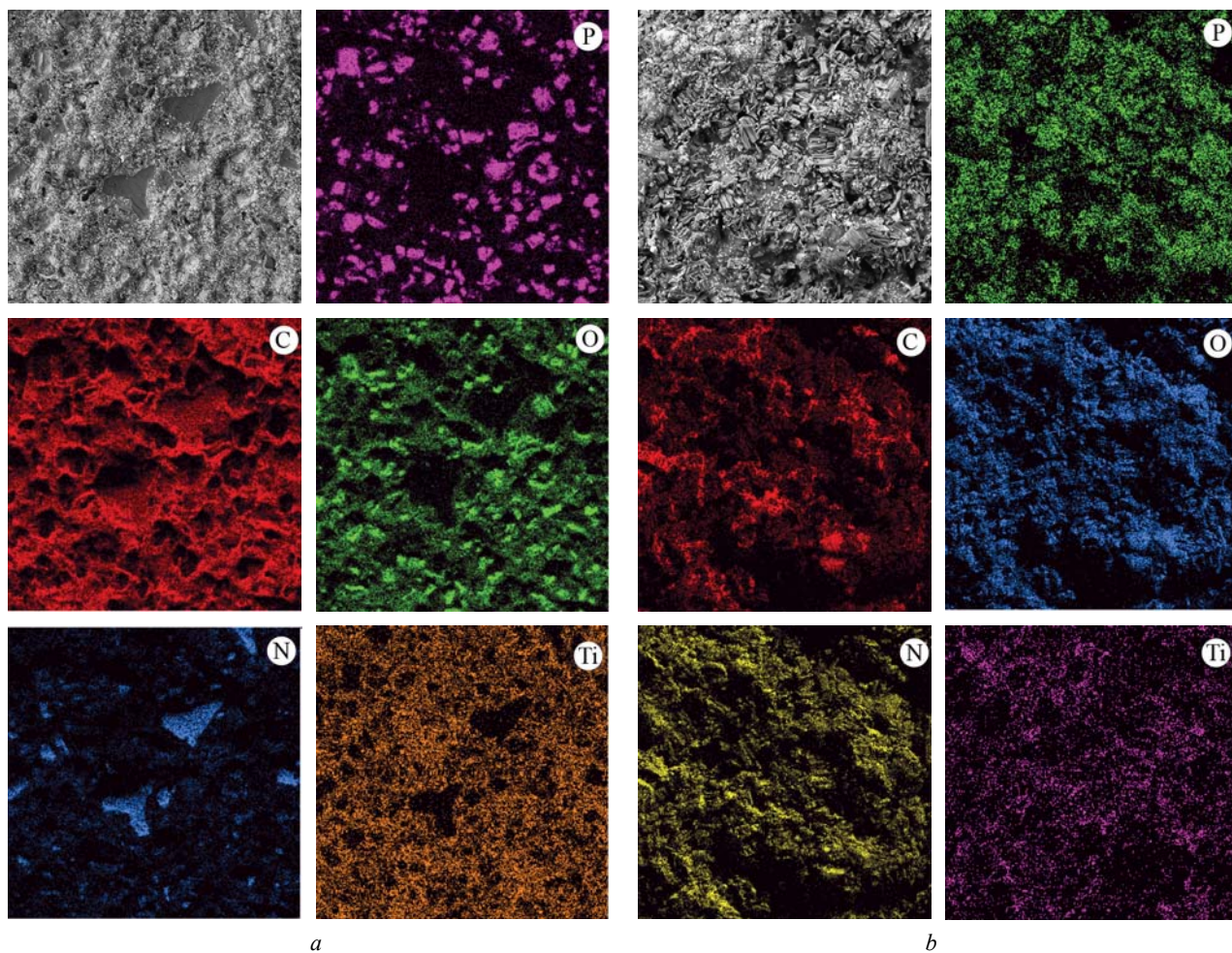


Рис. 4. ЭДС карты распределения элементов ОВП: *a* — исходного образца на поле обзора 220×220 мкм; *b* — состаренного на 9 лет образца на поле обзора 210×210 мкм

Fig. 4. EDS maps featuring the distribution of intumescent fire proof elements: *a* — the initial sample on the 220×220 μm field of view; *b* — the sample exposed to nine-years artificial ageing on the 210×210 μm field of view

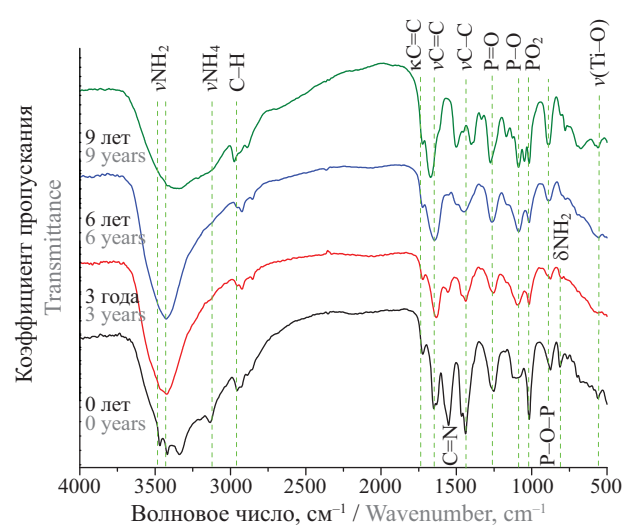


Рис. 5. ИК-спектры образцов ОВП: исходного и состаренных на 3, 6 и 9 лет

Fig. 5. IR-spectra of intumescent fire-proof samples in their initial conditions and following the exposure to artificial ageing (3, 6 and 9 years)

В первые три года старения происходят изменения, затрагивающие аминогруппы меламина и полифосфата аммония. Изменение интенсивности пиков свободной и ассоциированной связи $\text{P}=\text{O}$, вероятно, связано с кристаллизацией новых соединений фосфата и аммония. В результате дальнейшего старения становятся заметны изменения в области деформационных колебаний $\text{C}-\text{H}$ связей и рост влияния $-\text{OH}$, $-\text{CONH}$ групп, что может служить подтверждением протекания реакций обрыва цепи и роста аморфной составляющей в образце [18, 20]. Появление интенсивной полосы поглощения при 680 cm^{-1} в состаренном на 9 лет образце соответствует активной моде анатаза (полиморфная модификация рутила) [26], что возможно в условиях повышения кислотности среды.

Как показал качественный рентгенофазовый анализ ОВП (рис. 6), исходный несостаренный образец состоит из следующих кристаллических фаз: фосфат аммония (NH_4PO_3), пентаэритрит ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_4$),

Таблица 1. Принадлежность полос поглощения функциональным группам
Table 1. Distribution of absorption bands between functional clusters

0 лет 0 years	3 года 3 years	6 лет 6 years	9 лет 9 years	Функциональная группа Functional cluster	Фаза / Phase
3477 3416 3329	3423	3430	3358	$n\text{NH}_2$	Меламин / Melamine
3134				$n\text{NH}_4^+$	Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate
2956 2882	2953 2923 2846	2953 2919 2852	2970 2886	C-H/O/OH	Пентаэритрит, связующее Pentaerythritol, the binder
1718	1721	1721	1725	C=O	Связующее / Binder
1647	1627	1641	1670	C=C	Меламин / Melamine
1553	1550	1500	1504	C=N	То же / The same
1439	1431	1449		$n\text{NH}_4^+$	Пентаэритрит / Pentaerythritol
			1402	C-N	Амиды / Amides
1251	1255	1261	1274	P=O	Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate
1120	1164	1164	1171 1120	C-H/O/OH	Пентаэритрит, связующее Pentaerythritol, the binder
1090	1090	1087	1089 1047	P-O	Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate
1013	1016	1016	1013	PO ₂	Пентаэритрит / Pentaerythritol
875	872	885	895	P-O-P	Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate
808	802		808	$\delta\text{C-H}/\delta\text{NH}_2$	Меламин / Melamine
761	771	775	775	P-O	Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate
			674	Ti-O	Анатаз / Anatase
557	563	557	557	$\nu(\text{Ti-O})$	Рутил / Rutile

меламин ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$), рутил (TiO_2) и дифосфат тетрааммония ($(\text{NH}_4)_4\text{P}_2\text{O}_7$) (табл. 2).

С увеличением возраста образцов фазовый состав данного ОВП остается неизменным, но изменяются соотношения кристаллических фаз, увеличивается концентрация дифосфата тетрааммония и уменьшается концентрация меламина. Кроме того, с увеличением возраста образца происходят небольшие (до 2 %) изменения объемов кристаллической ячейки главных фаз: увеличение в случае фосфата аммония и уменьшение в случае оксида титана.

Выводы

Как показали данные комплексного исследования, в результате климатического воздействия происходят существенные изменения компонентного и структурного состава покрытия. Старение покрытий даже на 3 года приводит к снижению концентрации основных компонентов, ингибирующих процесс горения: полифосфата аммония на 15 %

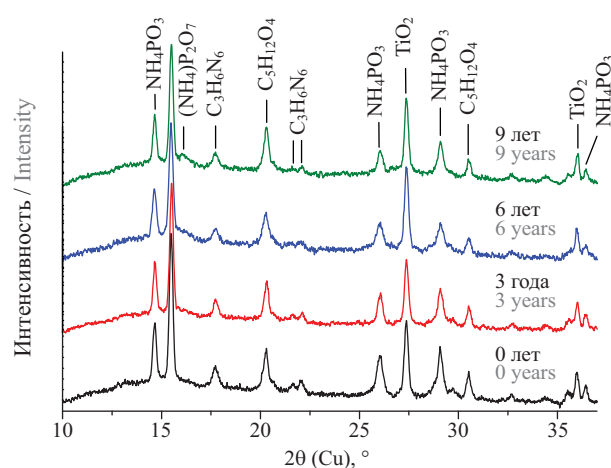


Рис. 6. Дифрактограммы исходного и состаренного на 3, 6, 9 лет образцов ОВП с обозначенными характерными максимумами основных фаз

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of initial intumescent fire-proof coating samples and those exposed to artificial ageing (3, 6, 9 years) with characteristic peaks of main phases

Таблица 2. Полуколичественный фазовый состав исследуемых образцов
Table 2. The quantitative phase composition of the studied samples

Фазовый состав Phase composition	Формула Formula	0 лет 0 years	3 года 3 years	6 лет 6 years	9 лет 9 years
Полифосфат аммония / Ammonium polyphosphate	NH_4PO_3	53	51	47	46
Пентаэритрит / Pentaerythritol	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_4$	14	15	16	16
Меламин / Melamine	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	7	6	5	4
Диоксид титана / Titanium dioxide	TiO_2	25	25	28	28
Дифосфат тетрааммония / Tetra ammonium diphosphate	$(\text{NH}_4)_4\text{P}_2\text{O}_7$	1	3	4	6

Примечание. Полуколичественный состав рассчитан по соотношению интегральных площадей дифракционных максимумов (погрешность анализа $\pm 1\%$).

Note. The correlation between integral areas of diffraction peaks (analytical error $\pm 1\%$) is used to analyze the semiquantitative composition.

и меламин на 40 %, что вызывает уменьшение коэффициента вспучивания более чем в 2 раза и времени прогрева необогреваемой стороны пластины. Подобные изменения свидетельствуют о снижении огнезащитной эффективности примененного огнезащитного материала.

Для контроля сохранения огнезащитных свойств и фиксации изменений в многокомпонентных системах данного типа, используемых на объектах эксплуатации, предлагается постоянный контроль в виде оценочного ежегодного исследования, в том числе комплексом используемых методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонова Д.И.* Сравнительный анализ токсичности основных групп антипиренов (обзор литературы) // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2008. № 3 (13). С. 117–128.
2. *Troitzsch J.* Plastics flammability handbook: Principles, regulations, testing, and approval. 3rd ed. Munich : Carl Hanser Verlag, 2004. 718 p.
3. Fire retardant materials / ed. by A.R. Horrocks, D. Price. New York : CRC Press, 2001. 276 p.
4. *Вахитова Л.Н., Таран Н.А., Лапушкин М.П., Рыбак В.В., Дридж В.Л., Бурдина Я.Ф.* Влияние структуры амина на огнезащитную эффективность системы полифосфат аммония/пентаэритрит/амин // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. 2014. Вып. 1 (22). С. 142–149. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/25983/1/17.pdf>
5. *Халтуринский Н.А., Рудакова Т.А.* О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 8 (145). С. 220–227. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20214782>
6. *Korotkov A.S., Gravit M.* 3D-map modelling for the melting points prediction of intumescent flame-retardant coatings // SAR and QSAR in Environmental Research. 2017. Vol. 28. Issue 8. Pp. 677–689. DOI: 10.1080/1062936X.2017.1370725
7. *Сильников М.В., Гравит М.В., Зыбина О.А.* Термоаналитическое исследование различных марок полифосфата аммония для интумесцентных огнезащитных композиций. Вопросы оборонной техники // Научно-технический журнал. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10 (99–100). С. 76–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27170060>
8. *Рудакова Т.А., Евтушенко Ю.М., Григорьев Ю.А., Батраков А.А.* Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония – пентаэритрит в интумесцентных системах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 3. С. 24–31. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/371>
9. *Li G., Liang G., He T., Yang Q., Song X.* Effects of EG and MoSi_2 on thermal degradation of intumescent coating // Polymer Degradation and Stability. 2007. Vol. 92. No. 4. Pp. 569–579. DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2007.01.018
10. *Gu J., Zhang G., Dong S., Zhang Q., Kong J.* Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame-retardant coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 18. Pp. 7835–7841. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.03.020

11. Ненахов С.А., Пименова В.П. Динамика вспенивания огнезащитных покрытий на основе органо-неорганических составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 8. С. 17–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903009>
12. Gu L., Qiu J., Yao Y., Sakai E., Yang L. Functionalized MWCNTs modified flame retardant PLA nanocomposites and cold rolling process for improving mechanical properties // Composites Science and Technology. 2018. Vol. 161. Pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.033
13. Vahabi H., Gholami F., Karaseva V., Laoutid F., Mangin R., Sonnier R. et al. Novel nanocomposites based on poly (ethylene-co-vinyl acetate) for coating applications: The complementary actions of hydroxyapatite, MWCNTs and ammonium polyphosphate on flame retardancy // Progress in Organic Coatings. 2017. Vol. 113. Pp. 207–217. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.08.009
14. Li Y., Gao Y., Cao Y., Li H. Electrochemical sensor for bisphenol A determination based on MWCNT/melamine complex modified GCE // Sensors and Actuators B: Chemical. 2012. Vol. 171–172. Pp. 726–733. DOI: 10.1016/j.snb.2012.05.063
15. Guo Z., Xu X.-F., Li J., Liu Y.-W., Zhang J., Yang C. Ordered mesoporous carbon as electrode modification material for selective and sensitive electrochemical sensing of melamine // Sensors and Actuators B: Chemical. 2014. Vol. 200. Pp. 101–108. DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.031
16. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю. Идентификационный контроль огнезащитных составов интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность/Technosphere safety. 2019. № 1 (22). С. 52–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37134622>
17. Боровик С.И., Трофимова Л.А. Анализ методик оценки влияния эксплуатационных факторов на огнезащитные покрытия для металлических конструкций // Научные исследования: теория, методика и практика : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 19 нояб. 2017 г.). В 2-х т. Т. 2. Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2017. С 18–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32334776>
18. Андронов В.А., Данченко Ю.М., Бухман О.М. Подходы к определению сроков службы огнезащитных полимерных покрытий // Сборник научных трудов. Вып. 31. Харьков : НУЦЗУ, 2012. С. 10–18. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3690>
19. Вахитова Л.Н., Лапушкин М.П., Калафат К.В. Срок службы огнезащитных покрытий вспучивающегося типа // F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты. 2011. № 2 (50). С. 58–61.
20. Умрихина М.Ю., Шорохова Т.О., Уткин С.В., Пьянкова Л.А., Краснова Л.Ю. Исследование огнезащитных вспучивающихся покрытий при их эксплуатации методами рентгенофазового, термического анализа и ИК-спектроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 3. С. 25–31. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31
21. Смирнов Н.В., Дудеров Н.Г., Булага С.Н., Михайлова Е.Д., Толпекина Н.А., Лезова М.В., Булгаков В.В. Оценка огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации: методика. 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2016.
22. Теплоухов А.В., Зверев В.Г., Гаращенко А.Н. Методика и результаты оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 1. С. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16
23. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу : методика. М. : ВНИИПО, 1998. 19 с.
24. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М. : Иностранная литература, 1963. 201 с.
25. Справочные таблицы основных спектроскопических данных (ИК-, УФ-, ЯМР-спектроскопия и масс-спектрометрия). Минск, 2001. 43 с.
26. Ding Z., Lu G.Q., Greenfield P.F. Role of the Crystallite Phase of TiO₂ in Heterogeneous Photocatalysis for Phenol Oxidation in Water // The Journal of Physical Chemistry B. 2000. Vol. 104. Pp. 4815–4820. DOI: 10.1021/jp993819b

REFERENCES

1. Leonova D.I. A comparative analysis of the toxicity of the main groups of flame retardants (literature review). *Actual problems of transport medicine*. 2008; 3(13):117-128. (rus.).
2. Troitzsch J. *Plastics flammability handbook: Principles, regulations, testing, and approval*. 3rd ed. Munich, Carl Hanser Verlag, 2004; 718.

3. *Fire retardant materials* / Ed. by A.R. Horrocks, D. Price. New York, CRC Press, 2001; 276.
4. Vakhitova L.N., Taran N.A., Lapushkin M.P., Rybak V.V., Dridzh V.L., Burdina Y.F. The effect of the amine structure on the flame retardant efficiency of the ammonium polyphosphate / pentaerythritol / amine system. *Science praci DonNTU. Seria: Chemistry and chemical technology*. 2014; 1(22):142-149. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/25983/1/17.pdf> (rus.).
5. Khalturinsky N.A., Rudakova T.A. The mechanism of formation of fire protective intumescent coatings. *News SFU. Technical science*. 2013; 8(145):220-227. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20214782> (rus.).
6. Korotkov A.S., Gravit M. 3D-map modelling for the melting points prediction of intumescent flame-retardant coatings. *SAR and QSAR in Environmental Research*. 2017; 28(8):677-689. DOI: 10.1080/1062936X.2017.1370725
7. Silnikov M.V., Gravit M.V., Zybina O.A. Thermoanalytical study of various grades of ammonium polyphosphate for intumescent flame-retardant compositions. *Questions of defense equipment. Scientific and technical journal. Series 16. Technical means of countering terrorism*. 2016; 9-10(99-100):76-79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27170060> (rus.).
8. Rudakova T.A., Yevtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Batrakov A.A. Ways of reducing the temperature of foaming in the system ammonium polyphosphate – pentaerythritol in intumescent systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(3):24-31. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/371> (rus.).
9. Li G., Liang G., He T., Yang Q., Song X. Effects of EG and MoSi₂ on thermal degradation of intumescent coating. *Polymer Degradation and Stability*. 2007; 92(4):569-579.
10. Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame-retardant coatings / Gu J., Zhang G., Dong S., Zhang Q., Kong J. // *Surface and Coatings Technology*. 2007; 201(I):18:7835-7841. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.03.020
11. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Dynamics of foaming of fire-retardant coatings based on organo-inorganic compounds. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(8):17-20. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903009> (rus.).
12. Gu L., Qiu J., Yao Y., Sakai E., Yang L. Functionalized MWCNTs modified flame retardant PLA nanocomposites and cold rolling process for improving mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2018; 161:39-49. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.033.
13. Vahabi H., Gholami F., Karaseva V., Laoutid F., Mangin R., Sonnier R. et al. Novel nanocomposites based on poly (ethylene-co-vinyl acetate) for coating applications: The complementary actions of hydroxyapatite, MWCNTs and ammonium polyphosphate on flame retardancy. *Progress in Organic Coatings*. 2017; 113:207-217. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.08.009
14. Li Y., Gao Y., Cao Y., Li H. Electrochemical sensor for bisphenol A determination based on MWCNT/melamine complex modified GCE. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2012; 171-172:726-733. DOI: 10.1016/j.snb.2012.05.063
15. Guo Z., Xu X.-F., Li J., Liu Y.-W., Zhang J., Yang C. Ordered mesoporous carbon as electrode modification material for selective and sensitive electrochemical sensing of melamine. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014; 200:101-108. DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.031
16. Bezaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu. Identification control of fire-protective compositions of the intumescent type by the methods of thermal analysis. *Tekhnosfernaya bezopasnost'/Technosphere safety*. 2019; 1(22):52-57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37134622> (rus.).
17. Borovik S.I., Trofimova L.A. Analysis of methods for assessing the impact of operational factors on fire retardant coatings for metal structures. *Research: theory, methodology and practice : mat. III Int. scientific-practical conf. (Cheboksary, November 19, 2017)*. In 2 volumes. Vol. 2. Cheboksary, Central nervous system "Interactive plus" Publ., 2017; 18-21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32334776> (rus.).
18. Andronov V.A., Danchenko Yu.M., Bukhman O.M. Approaches to determining the life of flame retardant polymer coatings. *Collection of scientific papers. Vol. 31*. Kharkiv, NUTSZU, 2012; 10-18. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3690> (rus.).
19. Vakhitova L.N., Lapushkin M.P., Calafat K.V. The service life of fire retardant coatings intumescent type. *F + S: Safety and Fire Protection Technologies*. 2011; 2(50):58-61. (rus.).
20. Umrikhina M.Yu., Shorokhova T.O., Utkin S.V., Pyankova L.A., Krasnova L.Yu. Study of intumescent coatings in operation using x-ray phase and thermal analysis and IR spectroscopy. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2020; 86(3):25-31. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31

21. Smirnov N.V., Duderov N.G., Bulaga S.N., Mikhailova E.D., Tolpekina N.A., Lezova M.V., Bulgakov V.V. *Evaluation of the fire-retardant properties of coatings depending on their service life: methodology*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2016. (rus.).
22. Teploukhov A.V., Zverev V.G., Garashchenko A.N. Methodology and results of estimation of the influence of structures long-term exploitation on basic properties of the intumescent flame-retardant coatings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(1):9-16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16 (rus.).
23. *Determination of heat-insulating properties of fire-protective coatings for metal : methodology*. Moscow, VNIPO, 1998; 19. (rus.).
24. Bellamy L.J. *The infra-red spectra of complex molecules*. London : Methuen & Co., 1954; 300.
25. Reference tables of basic spectroscopic data (IR, UV, NMR spectroscopy and mass spectrometry). Minsk, 2001; 43. (rus.).
26. Ding Z., Lu G.Q., Greenfield P.F. Role of the Crystallite Phase of TiO₂ in Heterogeneous Photocatalysis for Phenol Oxidation in Water. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2000; 104:4815-4820. DOI: 10.1021/jp993819b

Поступила 31.07.2020, после доработки 28.08.2020;

принята к публикации 29.09.2020

Received July 31, 2020; Received in revised form August 28, 2020;

Accepted September 29, 2020

Информация об авторах

УМРИХИНА Марина Юрьевна, инженер, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4657-2894; e-mail: ipl@ipl-spb.ru

ШОРОХОВА Татьяна Олеговна, инженер, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4155-2429; e-mail: tanya_ipl_spb@mail.ru

ПЬЯНКОВА Любовь Алексеевна, канд. геолого-минерал. наук, ведущий специалист сектора рентгеновской техники, АО «Научные приборы», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 69568, ORCID: 0000-0002-9415-5622; e-mail: lyuba_pyan@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Андрей Александрович, канд. физ.-мат. наук, ведущий специалист отдела исследований, ООО «ТЕСКАН», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9810-6932; e-mail: aka@tescan.ru

УТКИН Сергей Вячеславович, начальник, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1085392, ORCID 0000-0003-4086-7154; e-mail: ipl@ipl-spb.ru

Information about the authors

Marina Yu. UMRICHINA, Engineer, Testing Fire Laboratory on Saint Petersburg, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4657-2894; e-mail: ipl@ipl-spb.ru

Tatyana O. SHOROKHOVA, Engineer, Testing Fire Laboratory on Saint Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4155-2429; e-mail: tanya_ipl_spb@mail.ru

Lyubov A. PYANKOVA, Cand. geological mineral. Sci., Leading Specialist of the X-ray Technology Sector, Scientific Instruments JSC, St. Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 69568, ORCID: 0000-0002-9415-5622; e-mail: lyuba_pyan@mail.ru

Andrey A. KUDRYAVTSEV, Ph.D. physical-mat. Sci., Leading Specialist of the Research Department, TESCO Ltd., St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9810-6932; e-mail: aka@tescan.ru

Sergey V. UTKIN, Head, Testing Fire Laboratory on Saint Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 1085392, ORCID 0000-0003-4086-7154; e-mail: ipl@ipl-spb.ru

Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов

© И.В. Архангельский¹ ✉, И.А. Годунов^{1, 3}, Н.В. Яшин^{1, 3},
Ю.К. Нагановский², О.Н. Шорникова¹

- ¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 3)
- ² Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИПО, 12)
- ³ Акционерное общество «Институт новых углеродных материалов и технологий» (Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 11)

АННОТАЦИЯ

Введение. Огнезащитные терморасширяющиеся (вспучивающиеся) составы активно используются в качестве средств пассивной огнезащиты. В условиях пожара эти покрытия вспениваются, превращаясь в пенококсы, который переходит в пену. Данные продукты обладают различными огнезащитными свойствами. Основой этих превращений является процесс пенообразования, кинетика которого определяет огнезащитные характеристики используемых составов. В работе рассмотрена кинетика процесса пенообразования при пиролизе четырех различных вспенивающихся составов, для трех из которых в качестве терморасширяющегося агента использована классическая триада: полифосфат аммония – пентаэритрит – меламин, а для четвертого – интеркалированный графит.

Методы исследования. Термический анализ широко используется для идентификации и исследования различных материалов, веществ и средств огнезащиты. Однако кинетических исследований с использованием термоаналитических методов авторами в литературе не обнаружено. В данной работе использованы методы неизотермической кинетики для выявления механизма пенообразования. С этой целью проведены четыре серии термогравиметрических испытаний при различных скоростях нагревания для каждого исследованного состава. Полученные экспериментальные результаты позволили решить обратную и прямую кинетические задачи и найти механизмы процессов.

Результаты и обсуждения. Методами неизотермической кинетики показано, что низкотемпературные этапы термолитиза для всех образцов можно считать брутто-одностадийными процессами. Решение прямой кинетической задачи установило, что для всех исследованных составов лимитирующая стадия пенообразования описывается уравнением Аврами – Ерофеева, при этом значения кинетических параметров существенно различаются между собой. Следовательно, пенообразование протекает по одному и тому же механизму для образцов разного состава. Механизм пенообразования для образца с интеркалированным графитом зависит от условий нагревания.

Выводы. Установлено, что исследованные составы при высоких температурах переходят в вязкотекучее состояние. При этом лимитирующей стадией процесса пенообразования является зародышеобразование первичных пузырьков в объеме жидкой фазы. Этот процесс определяет кинетику вспенивания, свойства пенококсов и его теплофизические характеристики.

Ключевые слова: вспенивающиеся огнезащитные материалы; термический анализ; неизотермическая кинетика; стадийность процесса; формально-кинетические расчеты; механизм пенообразования

Для цитирования: Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 71–81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81

✉ Архангельский Игорь Валентинович, e-mail: arkh1@yandex.ru

The kinetics of intumescent flame retardant foaming

© Igor V. Arkhangelsky¹ ✉, Igor A. Godunov^{1, 3}, Nikolay V. Yashin^{1, 3},
Yury K. Naganovskii², Olga N. Shornikova¹

- ¹ Lomonosov Moscow State University (Leninskiye Gory, 1, bldg. 3, Moscow, 119991, Russian Federation)
- ² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (mkr. VNIPO, 12, Balashiha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)
- ³ Institute of New Carbon Materials and Technologies (INCMAT) (Leninskiye Gory, 1, bldg. 11, Moscow, 119991, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Intumescent flame retardants are intensively used as passive fire protection means. Under fire conditions, these coatings foam and turn into coke, which turns into ash. These products have various fire resistant properties. These transformations are possible due to the foaming process, whose kinetics determines the fire protective characteristics of the compositions used. The paper considers the kinetics of the foaming process in the course of the pyrolysis of four different foaming compositions. The classical triad was used as a thermally expanding agent for the three of them, it includes ammonium polyphosphate, pentaerythritol, and melamine, and the fourth one has intercalated graphite.

Research methods. Thermal analysis is widely used to identify and study various materials, substances and fire retardants. However, we have not found any kinetic studies performed using methods of thermal analysis in the literature. In this work, methods of non-isothermal kinetics are used to identify the mechanism of foaming. For this purpose, four series of thermogravimetric tests were carried out at different heating rates for each composition under study. The results of the experiment made it possible to solve inverse and direct kinetic problems and identify mechanisms of the processes.

Results and discussion. Methods of non-isothermal kinetics were employed to show that low-temperature stages of thermolysis can be considered as gross-one-stage processes for all samples. The solution of the direct kinetic problem has helped to identify that the limiting foaming stage is described by the Avrami – Erofeev equation for all compositions under study, while the values of kinetic parameters differ significantly. Consequently, foaming proceeds are similar for samples having different compositions. The foaming of the sample containing intercalated graphite depends on heating conditions.

Conclusions. It was identified that the studied compositions transform into the viscous-fluid state at high temperatures. In this case, the limiting stage of the foaming process is the nucleation of primary bubbles in the volume of the liquid phase. This process determines the kinetics of foaming, coke properties and its thermo-physical characteristics.

Keywords: foaming fire retardant materials; thermal analysis; non-isothermal kinetics; process staging; formal kinetic calculations; foaming mechanism

For citation: Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovskii Yu.K., Shornikova O.N. The kinetics of intumescent flame retardant foaming. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):71-81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81 (rus.).

✉ Igor Valentinovich Arkhangelsky, e-mail: arkh1@yandex.ru

Введение

Огнезащитные вспенивающиеся составы (ОВС) активно используются в противопожарной практике в качестве средств пассивной огнезащиты на протяжении последних нескольких десятков лет. Впервые научные основы синтеза вспенивающихся систем представлены в работе Х. Вандерсалла [1] в начале 1970-х годов. В последнее время исследованию процессов пенообразования интумесцентных покрытий посвящен целый ряд фундаментальных работ [2–6], обстоятельный обзор [7], диссертации [10, 11]. В этих работах, как и в большинстве подобных исследований, рассматриваются химические превращения, ведущие к пенообразованию с последующим образованием пенококса и пенозолы. Многокомпонентный состав ОВС определяет большое количество химических превращений, происходящих в данных составах при термическом воздействии, что зачастую сопровождается образованием сложной смеси продуктов термолитиза, установление состава которой является трудно решаемой задачей, что делает практически невозможным установление механизма процессов пенообразования только на основании представлений о химизме процесса. В работах [8, 9, 11–13] рассмотрен механизм и динамика вспенивания огнезащитных покрытий на основе ОВС. Полученные в этих работах результаты носят описательный характер и не дают представление о кинетике процессов.

Альтернативой химическому описанию пенообразования может являться представление кинетики механизма пенообразования по результатам термического анализа (ТА), который в настоящее время широко используется для исследования различных огнезащитных материалов. В частности, в РФ термический анализ активно применяется для идентификации материалов, веществ и средств огнезащиты, по методике, изложенной в ГОСТ Р 53293–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа».

Развитие современных методов ТА привело к возникновению так называемой неизотермической кинетики [14], в рамках которой решение обратной кинетической задачи основано на обработке экспериментальных данных в рамках общей кинетической модели [16]:

$$-d\alpha / dt = Ae^{-E/RT} f(\alpha), \quad (1)$$

где α — степень превращения испытуемого объекта;

t — время;

A и E — аррениусовские параметры;

T — абсолютная температура;

R — газовая постоянная;

$f(\alpha)$ — некоторая функция степени превращения протекающего процесса, характеризующая его механизм.

Применительно к результатам термоаналитического эксперимента используемая кинетическая модель может иметь, например, такой вид:

$$-\frac{d\alpha}{dT}\bigg|_{T=T_i} = \frac{A}{q_i} \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) (1-\alpha_i)^n, \quad (2)$$

где $(1-\alpha_i)$ — экспериментально измеряемая степень незавершенности процесса; $q_i = dT/dt|_{T=T_i}$ — мгновенная скорость нагревания (в нашем эксперименте — $q_i = q = \text{const}$).

Выбор $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$ обусловлен двумя причинами. Во-первых, эта функция успешно применяется для эмпирического описания кинетики многих гетерогенных процессов [16]. Во-вторых, уравнение n -го порядка является наиболее простым с точки зрения вычислительной процедуры.

Уравнение (2) легко линеаризуется:

$$\ln\left(-\frac{d\alpha}{dT}\bigg|_{T=T_i}\right) = \ln\left(\frac{A}{q_i}\right) - \frac{E}{RT_i} + n \ln(1-\alpha_i), \quad (3)$$

т.е. с вычислительной точки зрения это сводится к задаче линейного метода наименьших квадратов (МНК):

$$C\bar{x} = \bar{b}, \quad (4)$$

где C — матрица коэффициентов уравнения (3) ($C_{i1} = 1$, $C_{i2} = -1/T_i$, $C_{i3} = \ln(1-\alpha_i)$);

$\bar{x}$ — вектор искомых кинетических параметров;

$\bar{b}$ — вектор с компонентами $b_i = \ln\left(-b \frac{d\alpha}{dT}\bigg|_{T=T_i}\right)$.

Решение задачи (4) связано с определенными трудностями [15]. Относительная ошибка в вычисляемых параметрах определяется неравенством:

$$\frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} \leq \text{cond}(C) \frac{\|\Delta b\|}{\|b\|}, \quad (5)$$

где $\text{cond}(C)$ — число обусловленности матрицы C , а отношения справа и слева характеризуют относительные погрешности экспериментальных и расчетных параметров.

Так как первый и второй столбцы матрицы C почти линейно зависимы, то матрица C почти вырожденная. Таким образом, даже при небольших отклонениях в значениях экспериментальных параметров (статистические погрешности) мы получаем широкий доверительный интервал для рассчитанных значений.

В реальных задачах матрица C — невырождена, но число обусловленности достаточно велико и может составлять несколько сотен. Для наглядности представим эллипсоид решений, т.е. область в пространстве, все точки которой совместимы с экспериментальными данными в пределах ошибок измерений. Отношение длин наибольшей и наименьшей из главных полуосей этого эллипсоида равно числу обусловленности матрицы. Чем больше это число (чем ближе матрица к вырожденной), тем боль-

ше эксцентриситет эллипсоида, который в пределе при $\text{cond}(C) \rightarrow \infty$ превращается в бесконечный цилиндр, что является свидетельством некорректной задачи. Из этого следует, что, используя результаты единичного эксперимента, мы не можем получить корректные оценки кинетических параметров. Для получения надежных оценок кинетических параметров применяют совместную обработку нескольких наборов экспериментальных измерений, полученных при различных значениях какого-либо интенсивного экспериментального фактора, например, в случае политермического эксперимента обрабатываются данные при нескольких скоростях нагревания (обычно не менее трех). Изменение скорости нагревания приводит к повороту эллипсоида решений. Результаты обработки данных, полученных для одного и того же вещества при разных скоростях нагревания, определяются пересечением эллипсоидов решений для отдельных экспериментов. В итоге происходит существенное понижение числа обусловленности и сужение доверительных интервалов. В данном случае желательно, чтобы при всех используемых скоростях нагрева сохранялся один и тот же механизм процесса.

Разработан набор процедур, которые позволяют не только оценить кинетические параметры, но и найти статистически обоснованные кинетические уравнения [17]. Используя результаты ТА эксперимента, можно определить механизм термолитиза ОВС. Конечно, условия ТА эксперимента и условия пожара существенно различны, однако результаты применения неизотермической кинетики помогут понять последовательность явлений с ОВС в условиях пожара. В свою очередь, из кинетических данных может быть получена важная информация об изменении механизма огнезащитного действия вспенивающихся композиций при их модификации. В частности, такой подход может быть использован при исследовании старения ОВС.

Целью настоящей работы является кинетический анализ процесса вспенивания четырех образцов ОВС. Образцы ОВС1 и ОВС2 — это терморасширяющиеся (вспенивающиеся) огнезащитные составы, на основе двух разных воднополимерных дисперсий. Эти составы применяются для защиты строительных конструкций в закрытых помещениях. Исследован также огнезащитный терморасширяющийся состав ОВС3, содержащий органический растворитель (покрытие на его основе обладает более высокой атмосферостойкостью). Вспенивание ОВС1–ОВС3 определяется наличием в их составе классической для интумесцентных покрытий триады компонентов — меламина – пентаэритрит – полифосфат аммония, в то время как образец ОВС4 в качестве терморасширяющегося агента содер-

жит интеркалированный графит. Образцы четырех исследованных ОВС были получены в Институте новых углеродных материалов и технологий. В настоящей работе проведен кинетический анализ результатов термогравиметрических (ТГ) исследований указанных выше образцов материалов.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводились в динамической воздушной атмосфере, скорость потока 50...70 мл/мин, выполнено четыре серии экспериментов, для каждого образца, при скоростях нагрева 5, 10, 15, 20 К/мин, масса навесок составляла 5...7 мг. Держатели образца — платиновые тигли. Образцы для испытаний готовились из покрытий на основе ОВС1–ОВС4 стандартной толщины (1...1,5 мм) прокаткой до толщины 0,2...0,3 мм и последующей нарезкой. Уменьшение толщины необходимо для того, чтобы исключить вытекание вспенивающейся массы ОВС из тигля при нагревании образца.

Термоаналитические исследования осуществлялись с использованием синхронного комплекса STA 449 Jupiter (Netzsch, Германия) и термовесов TGA-951 (DuPont, США). Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью пакетов программ фирмы Netzsch: ProteusAnalysis, Thermokinetics. Процедура кинетического анализа представлена в [17].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 показаны ТГ и дифференциальные термогравиметрические (ДТГ) кривые процесса термолитиза образцов ОВС1 и ОВС4, полученные при скорости нагрева 10 К/мин.

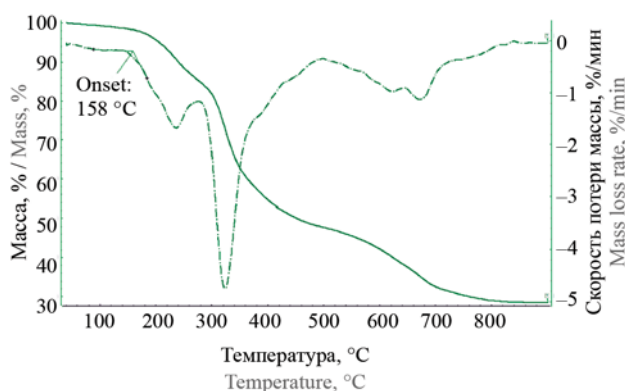


Рис. 1. ТГ (сплошная линия) и ДТГ (штрихпунктирная линия) термолитиза ОВС1 в интервале температур 30...900 °С
Примечание: на рисунке представлена экстраполированная температура начала вспенивания (так называемая onset), равная 158 °С, для образца ОВС1

Fig. 1. TG (solid line) and DTG (dash-dotted line) of OBC1 thermolysis in the temperature range 30...900 °C

Note: the figure shows the extrapolated temperature at the onset of foaming = 158 °C for sample OBC1

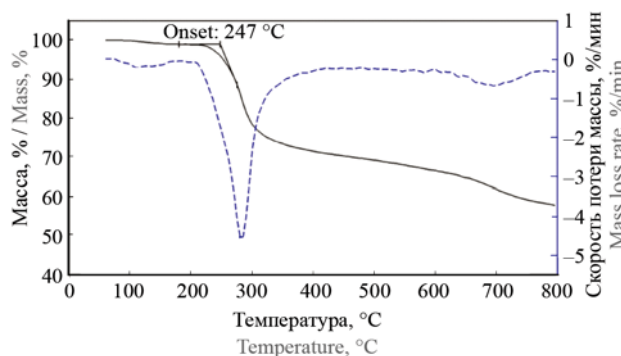


Рис. 2. ТГ (сплошная линия) и ДТГ (штрихпунктирная линия) термолитиза ОВС4 в интервале температур 30...900 °С
Примечание: на рисунке представлена экстраполированная температура начала вспенивания (так называемая onset), равная 247 °С, для ОВС4

Fig. 2. TG (solid line) and DTG (dash-dotted line) of OBC4 thermolysis in the temperature range 30...900 °C

Note: the figure shows the extrapolated temperature at the onset of foaming = 247 °C for OBC4

Аналогичные кривые были получены для других скоростей нагрева. Для образцов ОВС2 и ОВС3 термоаналитические кривые имеют подобный вид с образцом ОВС1, что, по-видимому, обусловлено близостью составов.

Наблюдаемую картину можно интерпретировать следующим образом: три этапа термолитиза (150...280, 280...500 и 500...800 °С) соответствуют пенообразованию, формированию пенококса и образованию пенозолы, соответственно. Такие этапы постулируются во многих работах, в частности [1, 7–10, 12]. На каждом из этих этапов могут протекать различные превращения: химические реакции, ведущие к зародышеобразованию различных продуктов, процессы тепло- и массопереноса, плавления и другие изменения физико-химических характеристик исследуемых образцов. Все эти явления могут протекать одновременно, и тот или иной этап может не быть брутто-одностадийным процессом и не являться его лимитирующей стадией.

Существенно иначе протекает процесс термолитиза ОВС4 по сравнению с другими образцами (см. рис. 2). Здесь наблюдается один интенсивный ДТГ эффект в области температур 200...400 °С. Процесс может проходить по иному механизму, чем для образцов ОВС1–ОВС3. Ниже будет показано, что кинетический анализ позволит ответить на этот вопрос.

Решение обратной кинетической задачи для серии измерений при различных скоростях нагрева, как правило, проводится с использованием безаприорных (т.е. без задания вида функции, определяющей механизм процесса) методов оценки аррениусовских параметров, например метода, представленного в работах [18–20]. Эти процедуры

позволяют оценить приближенные значения кинетических характеристик и сделать заключение о возможной стадийности процесса. В этом случае можно выявить, являются ли выделенные этапы брутто-одностадийными процессами.

На рис. 3, 4 показаны диаграммы Озавы – Флинн – Уолла [19, 20].

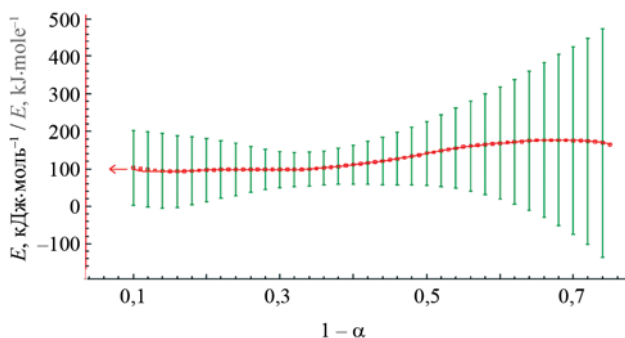


Рис. 3. Зависимость энергии активации E , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, в уравнении Аррениуса от степени незавершенности процесса ($1 - \alpha$) для образца ОВС1 на первом этапе термоллиза ($150 \dots 280^\circ\text{C}$)

Примечание: вертикальные штрихи характеризуют погрешность определения энергии активации

Fig. 3. Dependence of E activation energy, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, in the Arrhenius equation on the extent of process incompleteness ($1 - \alpha$) for OBC1 sample at the first stage of thermolysis ($150 \dots 280^\circ\text{C}$)

Note: vertical bars characterize the error in determining the activation energy

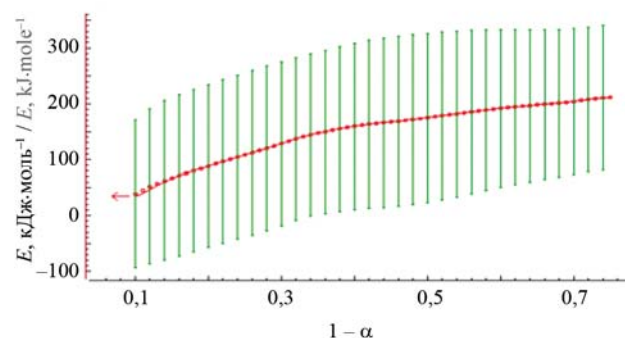


Рис. 4. Зависимость энергии активации E , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, в уравнении Аррениуса от степени незавершенности процесса ($1 - \alpha$) для образца ОВС4 для интервала температур $240 \dots 300^\circ\text{C}$

Примечание: вертикальные штрихи характеризуют погрешность определения энергии активации

Fig. 4. Dependence of E activation energy, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, in the Arrhenius equation on the extent of process incompleteness ($1 - \alpha$) for sample OBC4 in the temperature range $240 \dots 300^\circ\text{C}$

Note: vertical bars characterize the error in determining the activation energy

Из данных рис. 3 следует, что энергия активации постоянна практически для всего первого этапа термоллиза ОВС1. Подобная картина наблюдается и для образцов ОВС2 и ОВС3. В случае образца

ОВС4 (см. рис. 4) представленная зависимость также может рассматриваться как брутто-одностадийный процесс в пределах погрешности расчетов. В то же время для этого образца наблюдается тенденция к увеличению энергии активации. Это может быть связано с ходом процесса по другому механизму с подобной скоростью. Следовательно, для всех исследованных образцов термоллиз на первом этапе можно считать брутто-одностадийным процессом, протекающим по схеме $A \rightarrow B$, где A — исходный реагент, B — продукт термоллиза. Если считать, что первый низкотемпературный этап является процессом пенообразования, тогда данную схему можно представить следующим образом. Исходное твердое покрытие при температуре начала эффекта переходит в вязкотекучее состояние и образует реагент A . Газообразные продукты разложения формируют структуру пены, являющейся продуктом термоллиза B .

Полученные значения энергии активации и предэкспоненциального множителя используются как нулевое приближение при решении прямой кинетической задачи. Решение прямой задачи осуществляется с помощью линейного метода наименьших квадратов (МНК) с последующим уточнением нелинейным МНК [17]. В случае одностадийных процессов можно выбрать вид функций, наилучшим образом, со статистической точки зрения, аппроксимирующих экспериментальные данные для всех использованных скоростей нагревания.

В программе Netzsch Termokinetics представлен набор основных уравнений, описывающих макрокинетику анализируемых процессов [17]. Программа позволяет провести расчеты для набора из 18 функций. Затем на основе статистических критериев выбирался вид функции, наилучшим образом аппроксимирующей экспериментальные данные. В качестве эталонной модели (назовем ее условно модель 1) выбиралась модель с наилучшим приближением, т.е. с минимальным значением суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных данных. Затем каждая модель сравнивалась с эталонной. Для сравнения использовались дисперсионные отношения, т.е. величина критерия Фишера. Если экспериментальное значение критерия превышает критическое значение $F_{exp} > F_{crit}$, то различие текущей модели 2 и эталонной модели 1 значимо, и модель 1 больше подходит для описания эксперимента, чем модель 2.

Решение прямой кинетической задачи для начальных этапов термоллиза образцов ОВС1–ОВС4 показало, что лучшее описание эксперимента в данных условиях из 18 испытанных моделей дает уравнение Аврами – Ерофеева [17, 21] вида:

$$f(\alpha) = n(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{n-1/n}, \quad (6)$$

где α — степень превращения образца:

n — параметр порядка процесса зародышеобразования.

Статистический анализ показал, что для образца ОВС1 $F_{exp} = 1,0$ для уравнения (6) при F_{crit} ($P = 95 \%$, f_1, f_2) = 1,42, где P — вероятность; f_1, f_2 — степени свободы сравниваемых дисперсий. Коэффициент корреляции — 0,9988. Уравнение трехмерной диффузии Яндера [16, 17] — это следующее уравнение, выбранное программой, однако в этом случае $F_{exp} = 4,10$ при $F_{crit} = 1,42$, т.е. уравнение (6) наилучшим образом подходит для описания эксперимента.

На рис. 5 представлено сравнение результатов расчета и эксперимента для этого образца.

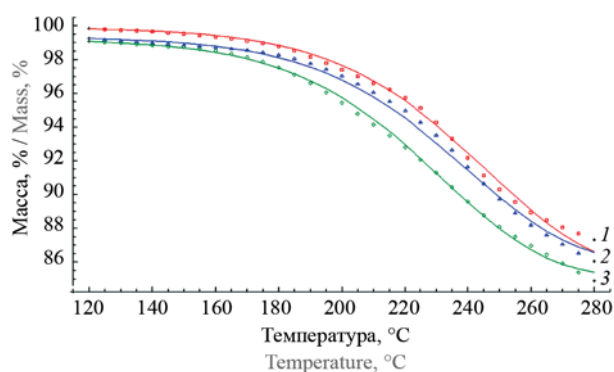


Рис. 5. Графическое сравнение результатов расчета (непрерывная линия) и эксперимента (отдельные значки) для ТГ-кривых первого этапа (120...280 °C) термоллиза образца ОВС1. Линия 1 — 20 К/мин; линия 2 — 15 К/мин; линия 3 — 10 К/мин

Fig. 5. Graphical comparison of calculation results (continuous line) and the experiment (separate icons) for TG-curves of the first stage (120...280 °C) of thermolysis of OBC1 sample. Line 1 — 20 K/min; line 2 — 15 K/min; line 3 — 10 K/min

У образца ОВС2 $F_{exp} = 1,0$ для уравнения (6) при $F_{crit} = 1,47$ коэффициент корреляции 0,9990. Следующее уравнение — также уравнение Яндера при $F_{exp} = 8,10$, т.е. и в этом случае уравнение (6) наилучшим образом подходит для описания эксперимента (рис. 6).

Для образца ОВС3 эталонной является кинетическая модель по уравнению (6). Здесь $F_{exp} = 1$ при $F_{crit} = 1,47$. Коэффициент корреляции — 0,9981. Следующим будет также уравнение Яндера при $F_{exp} = 4,17$, т.е. уравнение (6) наилучшим образом подходит для описания эксперимента (рис. 7). Как и в предыдущих случаях, для образца ОВС4 для набора скоростей нагревания 10, 15, 20 К/мин (рис. 8) уравнение Аврами – Ерофеева является эталонной моделью $F_{exp} = 1$ при $F_{crit} = 1,47$. Коэффициент корреляции — 0,9984. Следующая модель — уравне-

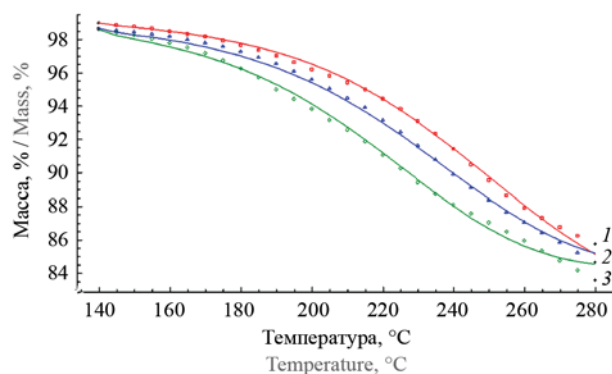


Рис. 6. Графическое сравнение результатов расчета (непрерывная линия) и эксперимента (отдельные значки) для ТГ-кривых первого этапа (150...280 °C) термоллиза образца ОВС2

Примечание: нумерация линий аналогична рис. 5

Fig. 6. Graphical comparison of the calculation results (continuous line) and the experiment (separate icons) for the TG-curves of the first stage (150...280 °C) of thermolysis of OBC2 sample
Note: line numbering is similar to Fig. 5

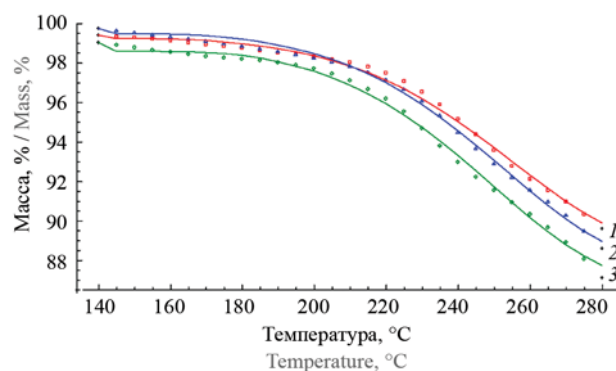


Рис. 7. Графическое сравнение результатов расчета (непрерывная линия) и эксперимента (отдельные значки) для ТГ-кривых первого этапа (140...280 °C) термоллиза образца ОВС3

Примечание: нумерация линий аналогична рис. 5

Fig. 7. Graphical comparison of calculation results (continuous line) and the experiment (separate icons) for the TG-curves of the first stage (140...280 °C) of thermolysis of OBC3 sample
Note: line numbering is similar to Fig. 5

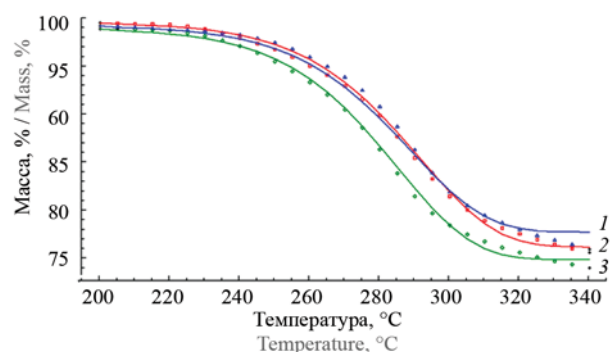


Рис. 8. Графическое сравнение результатов расчета (непрерывная линия) и эксперимента (отдельные значки) для ТГ-кривых первого этапа (200...340 °C) термоллиза образца ОВС4

Примечание: нумерация линий аналогична рис. 5

Fig. 8. Graphical comparison of calculation results (continuous line) and the experiment (separate icons) for TG-curves of the first stage (200...340 °C) of thermolysis of OBC4 sample
Note: line numbering is similar to Fig. 5

ние n -го порядка при $F_{exp} = 2,32$, т.е. и в этом случае уравнение (6) наилучшим образом подходит для описания данного эксперимента.

Следует отметить особенности пенообразования у образца ОВС4. Как видно из рис. 2, на ДТГ кривой наблюдается одномодовый эффект в области 200...400 °C по сравнению с другими образцами. Можно полагать, что процессы пенообразования и карбонизации протекают параллельно. Это косвенно подтверждается данными на рис. 4. Из этого следует, что изменение условий эксперимента, например скорости нагревания, может привести к изменению механизма процесса. На рис. 9 представлено сравнение результатов расчета и эксперимента при решении прямой кинетической задачи процесса пенообразования ОВС4. В данном случае расчет проводился по результатам экспериментов, проведенных со скоростями 5, 10, 15 К/мин, в интервале 200...340 °C. В представленном на рис. 9 примере наилучшее описание трех экспериментов дает уравнение (7), характеризующее процесс n -порядка продвижения реакционной поверхности раздела с катализом продуктом реакции:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n (1 + K_{cat}), \quad (7)$$

где K_{cat} — константа катализа реакции ее продуктом.

В этом случае уравнение (7) является эталонной моделью — $F_{exp} = 1$ при $F_{crit} = 1,47$. Коэффициент корреляции — 0,9990; для уравнения Аврами – Ерофеева $F_{exp} = 3,22$ при $F_{crit} = 1,47$. Следовательно, лимитирующая стадия термолитиза ОВС4 характеризуется уравнением (7) при данных экспериментальных условиях. Можно полагать, что таким процессом является разложение окисленного графита и образование терморасширенного графита, который ускоряет процесс распада

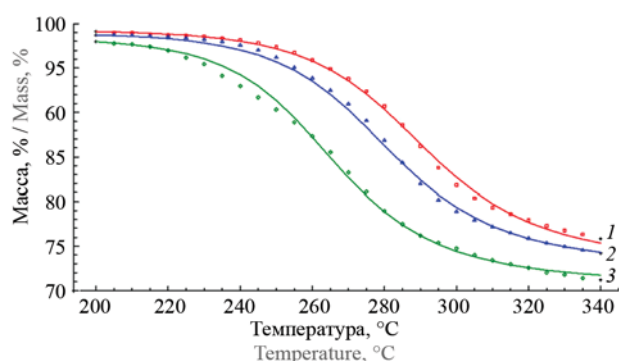


Рис. 9. Графическое сравнение результатов расчета (непрерывная линия) и эксперимента (отдельные значки) для ТГ-кривых первого этапа (200...340 °C) термолитиза образца ОВС4. Линия 1 — 15 К/мин; линия 2 — 10 К/мин; линия 3 — 5 К/мин

Fig. 9. Graphical comparison of calculation results (continuous line) and the experiment (separate icons) for the TG-curves of the first stage (200...340 °C) of thermolysis of OBC4 sample. Line 1 — 15 K/min; line 2 — 10 K/min; line 3 — 5 K/min

исходного компонента. Параллельно протекает явление пенообразования по уравнению (6), но оно не является лимитирующей стадией.

Следует отметить, что для образцов ОВС1–ОВС3 лимитирующей стадией остается уравнение Аврами – Ерофеева, независимо от набора скоростей нагревания при решении прямой задачи.

Известно [21], что уравнение Аврами – Ерофеева характеризует гетерогенный процесс случайного зародышеобразования в объеме реагирующего материала. При этом энергия активации E определяет энергию, необходимую для образования первичного зародыша, частотный фактор A — вероятность появления первичного зародыша в определенной точке объема реагента, а параметр порядка n пропорционален размеру такого зародыша.

В случае исследуемых ОВС результаты расчета можно интерпретировать следующим образом: по достижении температуры onset (рис. 1, 2) материал покрытия на основе исследуемых ОВС начинает переходить в вязкотекучее состояние, а газообразные продукты разложения вспенивают жидкую фазу. Уравнение Аврами – Ерофеева показывает, что зарождение первичных газовых пузырьков происходит в объеме жидкости. Следует отметить, что и в жидком состоянии реагирующая система остается гетерогенной из-за присутствия неорганических добавок. По-видимому, частицы этих добавок (например, диоксид титана) могут быть центрами зародышеобразования и способствовать появлению первичных пузырьков.

Таким образом, для всех исследованных составов лимитирующей стадией процесса пенообразования является процесс зародышеобразования в объеме жидкой фазы, в которую переходят исследуемые материалы при нагревании. Процесс протекает согласно уравнению Аврами – Ерофеева (6), хотя образцы ОВС3 и ОВС4 отличаются от двух других по некоторым физико-химическим свойствам. Эти процессы протекают при одинаковых условиях нагревания.

В таблице представлены численные значения кинетических параметров первого этапа термолитиза исследованных составов.

Значения кинетических параметров
Values of kinetic parameters

Образец Sample	E_a , кДж/моль E_a , kJ/mole	$\text{Log } A$, с ⁻¹ $\text{Log } A$, c ⁻¹	n
ОВС1	113 ± 20	10 ± 2	0,59 ± 0,08
ОВС2	187 ± 41	17 ± 4	0,35 ± 0,07
ОВС3	293 ± 25	27 ± 3	0,27 ± 0,01
ОВС4	295 ± 76	26 ± 7	0,43 ± 0,09

Результаты расчета кинетических параметров по термогравиметрическим кривым (табл.), согласно уравнению (6), различны для исследованных образцов при одинаковом механизме процесса. Так, образец ОВС1 имеет минимальные значения энергии активации и предэкспонента по сравнению с остальными образцами. Это говорит о том, что переход в вязкотекучее состояние и способность к пенообразованию у этого образца происходит при более низкой температуре, чем у других. При этом образуются более крупные зародыши пузырьков, формирующих структуру пены, о чем свидетельствует большее значение параметра n . В работе [22] продемонстрировано, что образцы ОВС1 и ОВС2 не идентичны в рамках термоаналитического эксперимента при подобном составе. Кинетические расчеты показали, что механизм пенообразования этих материалов одинаков, но различаются кинетические параметры.

Выводы

Полученные результаты дают основание полагать, что процесс пенообразования при нагревании вспенивающихся композиций является определяющим фактором их огнезащитных свойств.

Результаты настоящей работы показали, что формально-кинетические расчеты по данным ТГ эксперимента с применением процедур неизотермической кинетики [15, 17] позволили не только найти оценки кинетических параметров, но и выявить уравнение, характеризующее процесс пенообразования, одинаковое для всех исследованных объектов.

Установлено, что лимитирующей стадией процесса пенообразования является зародышеобразование в объеме жидкой фазы, в которую переходят исследуемые материалы при нагревании. Процесс протекает согласно уравнению Аврами – Ерофеева (6). Зародыши газовых пузырьков образуются в объеме реагента при его переходе в вязкотекучее состояние с определенным значением вязкости. Так, образец ОВС1 имеет минимальные значения энергии активации и предэкспонента по сравнению с остальными образцами. В то же время даже подобные по составу образцы не идентичны в рамках термоаналитического эксперимента [22].

Отмечается особое поведение образца ОВС4, который в экспериментальных условиях с пониженной температурной нагрузкой, т.е. при меньших скоростях нагревания, характеризуется другой лимитирующей стадией согласно уравнению (7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vandersall H.L.* Intumescent coating system, their development and chemistry // *Journal of Fire and Flammability*. 1971. No. 2. Pp. 97–140.
2. *Novel fire retardant polymers and composite materials*. Edited by De-Yi Wang. Woodhead Publishing, 2017. 342 p. DOI: 10.1016/C2014-0-01717-0
3. *Fire retardancy of polymers: New strategies and mechanisms*. Edited by T.R. Richard Hull. London : Royal Society of Chemistry, 2009. 454 p. DOI: 10.1039/9781847559210
4. *Polymer green flame retardants*. Edited by Constantine D. Papaspyrides, Pantelis Kiliaris. Elsevier, 2014. 942 p. DOI: 10.1016/C2010-0-66406-6
5. *Chao Zhang*. Reliability of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 140 p. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6
6. *Nolan D.P., Saudi Aramco*. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, 2019. 502 p. DOI: 10.1016/C2017-0-04314-8
7. *Ненахов В.А., Пименова В.П.* Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15209813>
8. *Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г.* О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927>
9. *Кропачев Р.В., Новокионов В.В., Вольфсон С.И., Михайлова С.Н.* Терморасширяющиеся полимерные композиционные материалы // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 5. С. 60–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23249582>
10. *Зыбина О.А.* Технология производства огнезащитных коксообразующих полимерных композиционных материалов для защиты различных объектов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. 278 с.

11. Головина Е.В. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 130 с.
12. Гравит М.В., Прусаков В.А., Коротин И.Г., Тимофеев Н.С., Симоненко Я.Б. Интумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита для строительных конструкций и кабельных линий воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 18–32. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.18-32
13. Рудакова Т.А., Евтушенко Ю.М., Григорьев Ю.А., Батраков А.А. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония – пентаэритрит в интумесцентных системах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 3. С. 24–32. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/371>
14. Šesták J., Hubík P., Mareš Jiří J. Thermal physics and thermal analysis: From macro to micro, highlighting thermodynamics, kinetics and nanomaterials. Springer International Publishing Switzerland, 2017. 567 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45899-1
15. Arkhangelsky I.V., Sipachev V.A. Calculation techniques for solving non-isothermal kinetic problems // Journal of Thermal Analysis. 1992. Vol. 38. Pp. 1283–1289. DOI: 10.1007/BF01979187
16. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций / пер. с фр. Н.М. Бажина и др.; под ред. В.В. Болдырева. М. : Мир, 1972. 554 с.
17. Arkhangelsky I.V., Dunaev A.V., Makarenko I.V., Tikhonov N.A., Belyaev S.S., Tarasov A.V. Non-isothermal kinetic methods. Workbook and laboratory manual. Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge. Berlin, Germany : Edition Open Acces, 2013. 73 p.
18. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // Nature. 1964. Vol. 201. Pp. 68–69. DOI: 10.1038/201068a0
19. Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1965. Vol. 38. Pp. 1881–1889. DOI: 10.1246/bcsj.38.1881
20. Flynn J., Wall L.A. A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters. 1966. Vol. 4. Pp. 232–241. DOI: 10.1002/pol.1966.110040504
21. Барпе П. Кинетика гетерогенных процессов. М. : Мир, 1984. 193 с.
22. Архангельский И.В., Нагановский Ю.К., Годунов И.А., Яшин Н.В. Термоаналитический межлабораторный эксперимент по идентификации материалов, веществ и средств огнезащиты // Пожарная безопасность. 2020. № 3. С. 15–23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001

REFERENCES

1. Vandersall H.L. *Intumescent coating system, their development and chemistry. Journal of Fire and Flammability*. 1971; 2:97-140.
2. *Novel fire retardant polymers and composite materials*. Edited by De-Yi Wang. Woodhead Publishing, 2017; 342. DOI: 10.1016/C2014-0-01717-0
3. *Fire retardancy of polymers: new strategies and mechanisms*. Edited by T.R. Richard Hull. London, Royal Society of Chemistry Publ., 2009; 454. DOI: 10.1039/9781847559210
4. *Polymer green flame retardants*. Edited by Constantine D. Papaspyrides & Pantelis Kiliaris. Elsevier Publ., 2014; 942. DOI: 10.1016/C2010-0-66406-6
5. Chao Zhang. *Reliability of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015; 155. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6
6. Nolan D.P., Saudi Aramco. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, 2019; 502. DOI: 10.1016/C2017-0-04314-8
7. Nenakhov V.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(8):11-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus.).

8. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):33-36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus.).
9. Kropachev R.V., Novokshonov V.V., Wolfson S.I., Mikhailova S.N. Thermally expanding polymer composite materials. *Bulletin of the technological University*. 2015; 18(5):60-63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23249582> (rus.).
10. Zybina O.A. *Technology for the production of fire retardant coke-forming polymer composite materials for the protection of various objects : dissertation of doctor of technical sciences*. St. Petersburg, 2018; 278. (rus.).
11. Golovina E.V. *Method for evaluating the heat resistance of intumescent flame retardants for oil and gas industry facilities : dissertation ... candidate of technical sciences*. Ekaterinburg, 2019; 130. (rus.).
12. Gravit M.V., Prusakov V.A., Korotin I.G., Timofeev N.S., Simonenko Ya.B. Intumescent structural curve-following fire protection of civil structures and cable lines. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):18-32. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.18-32 (rus.).
13. Rudakova T.A., Evtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Batrakov A.A. Ways to reduce the foaming temperature in the ammonium polyphosphate – pentaerythritol system in intumescent systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2015; 24(3):24-32. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/371> (rus.).
14. Šesták J., Hubík P., Mareš Jiří J. Thermal physics and thermal analysis: From macro to micro, high-lighting thermodynamics, kinetics and nanomaterials. *Springer International Publishing Switzerland*, 2017; 567. DOI: 10.1007/978-3-319-45899-1
15. Arkhangelsky I.V., Sipachev V.A. Calculation techniques for solving non-isothermal kinetic problems. *Journal of Thermal Analysis*. 1992; 38: 1283-1289. DOI: 10.1007/BF01979187
16. Delmon B. *Introduction a la cinétique hétérogène*. Paris, Gautier-Villars, 1969; 712. (fr.).
17. Arkhangelsky I.V., Dunaev A.V., Makarenko I.V., Tikhonov N.A., Belyaev S.S., Tarasov A.V. *Non-isothermal kinetic methods. Workbook and Laboratory Manual*. Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge. Berlin, Germany : Edition Open Acces, 2013; 73.
18. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*. 1964; 201:68-69. DOI: 10.1038/201068a0
19. Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1965; 38:1881-1889. DOI: 10.1246/bcsj.38.1881
20. Flynn J., Wall L.A. A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters*. 1966; 4:232-241. DOI: 10.1002/pol.1966.110040504
21. Barret P. *Cinétique hétérogène*. Gautier-Villars, Paris, 1973; 574. (fr.).
22. Arkhangelsky I.V., Naganovsky Yu.K., Godunov I.A., Yashin N.V. Thermoanalytic interlaboratory experiment for identification of materials, substances and fire protection equipment. *Fire Safety*. 2020; 3:15-23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001 (rus.).

Поступила 01.09.2020, после доработки 22.09.2020;

принята к публикации 09.10.2020

Received September 1, 2020; Received in revised form September 22, 2020;

Accepted October 9, 2020

Информация об авторах

АРХАНГЕЛЬСКИЙ Игорь Валентинович, канд. хим. наук, научный сотрудник химического факультета; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 47402, ORCID: 0000-0003-3311-420X; e-mail: arkh1@yandex.ru

Information about the authors

Igor V. ARKHANGELSKY, Cand. Sci. (Chem.), Researcher Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 47402, ORCID: 0000-0003-3311-420X; e-mail: arkh1@yandex.ru

ГОДУНОВ Игорь Андреевич, д-р хим. наук, профессор химического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Акционерное общество «Институт новых углеродных материалов и технологий» (ИНУМиТ), г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 44244, ORCID: 0000-0002-1683-2384; e-mail: godunov.msu@gmail.com

ЯШИН Николай Владимирович, д-р хим. наук, ведущий научный сотрудник химического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Акционерное общество «Институт новых углеродных материалов и технологий» (ИНУМиТ), г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 114937, ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin-n@yandex.ru

НАГАНОВСКИЙ Юрий Кузьмич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; РИНЦ ID: 166916, ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

ШОРНИКОВА Ольга Николаевна, канд. хим. наук, доцент химического факультета; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 118474, ORCID: 0000-0003-0098-7506; e-mail: onshornikova@gmail.com

Igor A. GODUNOV, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University; Institute of New Carbon Materials and Technologies (INCMAT), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 44244, ORCID: 0000-0002-1683-2384; e-mail: godunov.msu@gmail.com

Nikolay V. YASHIN, Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University; Institute of New Carbon Materials and Technologies (INCMAT), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 114937, ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin-n@yandex.ru

Yury K. NAGANOVSKIY, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashiha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 166916, ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

Olga N. SHORNIKOVA, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; РИНЦ ID: 118474, ORCID: 0000-0003-0098-7506; e-mail: onshornikova@gmail.com

ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР»

185031, Карелия, г. Петрозаводск, ул. Заводская, 4
Тел./факс: +7 (8142) 77-49-23, 57-34-23, 77-49-31



К 100-летию роботов

Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн

Из истории роботов

Упоминания разумных искусственных созданий впервые появились в художественно-фантастических произведениях. Среди них — широко известный роман Мэри Шелли «Франкенштейн», герой которого стал прообразом множества книжных, драматических и кинематографических персонажей. В пьесе Карела Чапека «Р.У.Р.», написанной в 1920 г., искусственные создания, заменяющие человека на каторжных работах, были названы роботами. Пьеса, по словам Айзека Азимова, стала бессмертной из-за слова «робот», вошедшего во все языки мира.

В 2020 г. отмечается уже 100-летний юбилей этих созданий с именем «робот». Сам Айзек Азимов для роботов ввел ставшие популярными три закона робототехники.

Уже со второй половины XX в. роботы стали основой технического прогресса, и на многих

машиностроительных предприятиях монотонный труд человека эффективно замещался промышленными роботами. Особенно значимо применение роботов в экстремальных условиях, среди которых можно выделить тушение пожаров — здесь используются пожарные роботы, освобождающие человека от опасной для жизни работы.

Роботизированные установки пожаротушения

Бурное развитие электроники и информационных технологий привело к значительным изменениям и в пожарной автоматике, неотъемлемой частью которой являются пожарные роботы. В наш цифровой век информационных технологий приоритет должен быть за интеллектуальными программируемыми системами, реагирующими на реальное развитие событий и обладающими функциями саморегулирования.

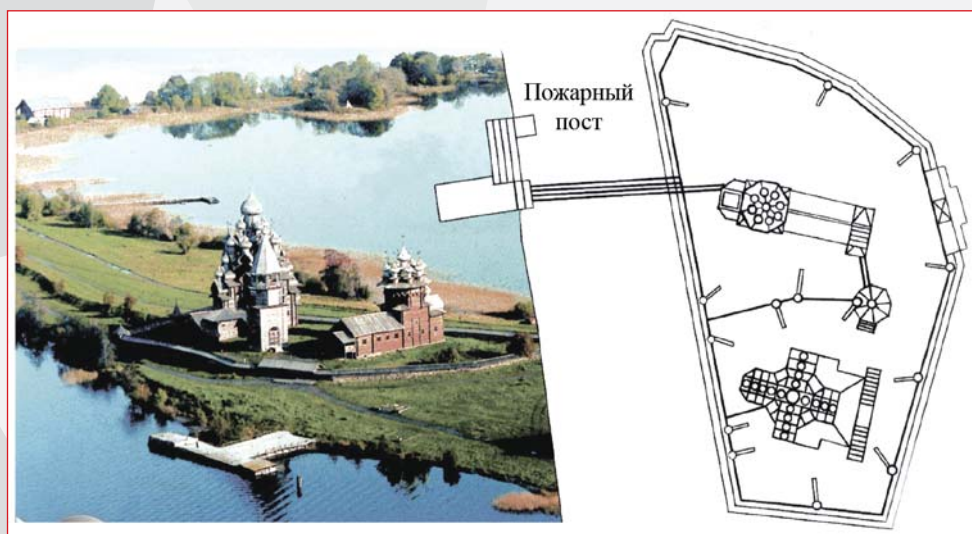


Рис. 1. Первый пожарный робот в России (1984 г.), предназначенный для защиты памятников деревянного зодчества музея-заповедника «Кижи»

В пожарной автоматике широкое распространение получили стационарные роботы, которые, как и промышленные роботы, имеют постоянное базирование. Они успешно заменяют традиционные спринклерные системы, которые, по сути, не претерпели изменений с XIX в.

Первый пожарный робот в нашей стране был создан в 1984 г. для защиты памятников деревянного зодчества музея-заповедника «Кижи» как альтернатива спринклерной системе, которую было сложно технически применить для наружного пожаротушения (рис. 1). Пожарные роботы первого поколения приняли также непосредственное участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. С учетом приобретенного опыта для защиты машинных залов Ленинградской АЭС был разработан и успешно внедрен комплекс роботизированных установок пожаротушения, удостоенный золотой медали на ВДНХ. В дальнейшем работы, проводившиеся Петрозаводским инженерным центром пожарной робототехники при тесном взаимодействии с Всероссийским ордена «Знак Почета» научно-исследовательским институтом противопожарной обороны (ВНИИПО) МЧС России, привели к созданию нового научно-технического направления — пожарной робототехники. По результатам этих работ Россия является первой страной мира, где законодательно и нормативно введен новый вид автоматических установок пожаротушения — роботизированные установки пожаротушения (РУП). Требования к РУП установлены Федеральным законом «О пожарной безопасности» № 123-ФЗ и нормативными документами ГОСТ Р 53326–2009, СП5.13130.2009 и ВНИПБ 39-20.

Научно-технические исследования

В процессе научно-технического поиска были заложены основные решения по устройству пожарных роботов и их составляющих компонентов, которые отражены в патентах № 1824207, 2050872, 2128536. Пожарный робот включает в себя рабочий орган — ствол с мехатронной системой, сенсорную часть и систему управления. Ствол имеет механизмы управления пространственным положением и состоит из подвижных звеньев. Подвижные звенья конструктивно выполнены для возможности перемещения в них потока жидкой среды под давлением.

Со временем сформировались требования к внешнему виду пожарного робота, в котором должны сочетаться приемлемое эстетическое восприятие и выполнение функций, обусловленных условиями эксплуатации изделия. По сути, робот пожарный, предназначенный для замены пожарного ствольщика в опасных местах, должен эргономически соответствовать параметрам человека в опе-

ративной меняющейся обстановке и выполнять действия его команд (рис. 2).

Промышленный дизайн изделия по патенту № 90498 и применение шарового поворотного канала позволили создать компактную конструкцию, в которой все мелкие элементы, датчики и кабели заключены в защитную обтекаемую оболочку с выделенной головной частью, оборудованную оптическими устройствами обнаружения

загорания, со стволом-автоматом, гармонично вписанным в корпус. Принятая компоновка пожарного робота с размещением оборудования в едином защищенном корпусе обеспечивает защиту от влияния внешней среды (температурных, климатических и механических воздействий).

В порядке выполнения работ по импортозамещению были созданы отечественные извещатели пламени ИП 328/330-1-1 во взрывозащищенном исполнении и на их базе — пожарные роботы во взрывозащищенном исполнении (рис. 3).



Рис. 2. Пожарный робот



а



б

Рис. 3. Извещатель пламени ИП 328/330-1-1-Ex (а) и пожарный робот для защиты операционного зала объекта МИК (Роскосмос) (б)

Обнаружение пламени осуществляется за счет комплексного кадрового анализа изображения с инфракрасной (ИК) матрицы и видеокамеры. На изображении с ИК-матрицы определяются области повышенной температуры, для этих областей производится накопление и оценка параметров флуктуации температуры, динамики границ и структуры. Также эти области анализируются на наличие характерных признаков пламени на видеоизображении (флуктуации, цвет, динамика изменения границ). При обнаружении пламени устройство обнаружения передает координаты очага пожарному роботу. Пожарные роботы передают информацию об обнаруженных очагах загорания в устройство сопряжения с объектом, которое методом триангуляции с учетом погрешностей результатов измерений определяет местоположение очага в защищаемой зоне в трехмерной системе координат.

Следует отметить проведенный большой комплекс работ по исследованию баллистики струй. Одной из основных задач пожарного робота является наведение струи на очаг загорания по заданным координатам и тушение очага загорания по заданной площади с заданной интенсивностью орошения.

Угловые координаты очага загорания в горизонтальной плоскости совпадают с угловыми координатами наведения ствола. В вертикальной плоскости ввиду параболической траектории струи угол наклона ствола для попадания в цель должен быть выше угловой координаты цели (очага загорания). Разность между ними образует угол возвышения, который зависит от многих факторов: расстояния до очага, угла цели, давления в сети,

расхода, угла распыливания, конструкции насадки. Задача наведения струи на очаг загорания по заданным координатам сводится к определению угла возвышения. При этом нужно знать параметры расчетной траектории, чтобы она с достаточной точностью совпадала с реальной траекторией струи. Для определения полета струи известные уравнения баллистики, связанные с полетом тел, могут приближенно использоваться только на начальной траектории. Это связано с необходимостью учета целого ряда параметров, относящихся к струям, связанных с изменением площади сечения струи, изменением формы и массы частиц воды, дробящихся в полете, переходом компактной струи к турбулентному потоку жидкости и воздуха с изменяющейся плотностью массы.

Ввиду большого количества факторов, влияющих на траекторию струи, и отсутствия математического уравнения траектории струи, был разработан программный метод с использованием экспериментальных данных из семейства траекторий, полученных опытным путем и заложенных в базу данных. Для формирования базы данных реальных координат проводилась инженерная фотосъемка траекторий струй с сотнями экспериментов по показателям расхода, давления и угла распыла в функции угла наведения и был разработан метод аппроксимации траекторий струй на основе данных, полученных экспериментальным путем (рис. 4 и 5). Проведенная научно-исследовательская работа по баллистике струй, основанная на опытных данных и подтвержденная многочисленными экспериментами, не имеющая аналогов, позволила решить актуальную задачу по автоматическому наведению струи на очаг загорания

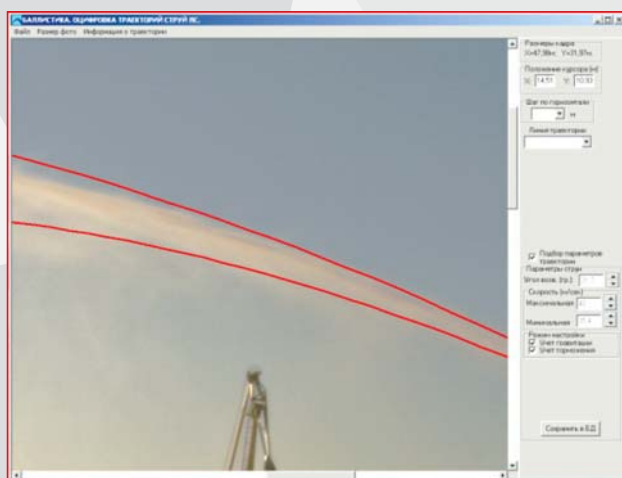


Рис. 4. Фрагмент фотосъемки струи с выделенными границами траектории

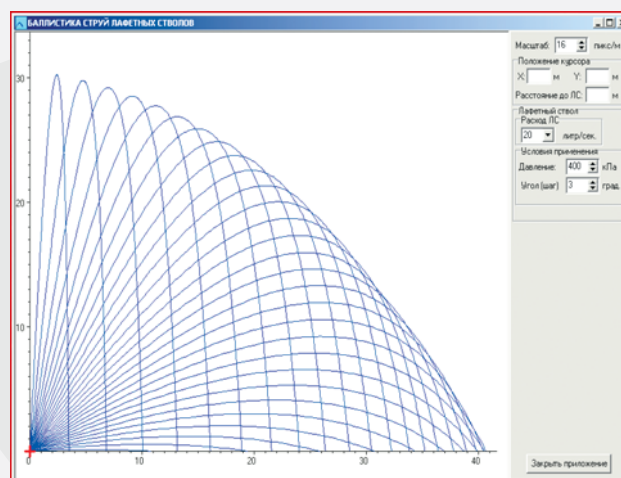


Рис. 5. Траектории струй в функции угла наведения для данных расхода и давления

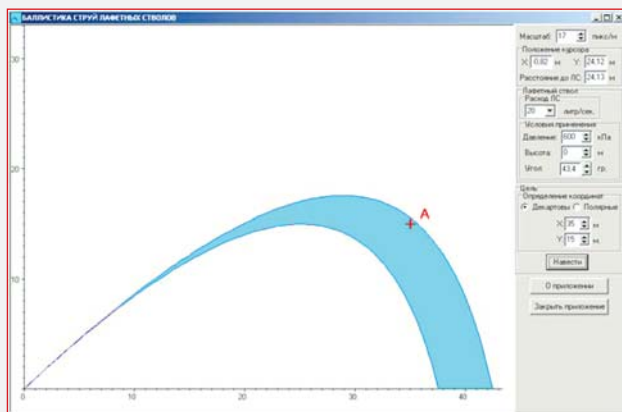


Рис. 6. Приложение для расчета траекторий струй и определения угла наведения струи к точке цели¹

по заданным координатам и тушению очага по заданной площади с заданной интенсивностью орошения. Результаты этой работы представлены в монографии Ю.И. Горбаня «Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране»².

Точность подачи струи на очаг загорания по заданным координатам по баллистической траектории зависит и от внешних факторов, например изменения давления в напорной сети; для

¹ Инженерный центр «ЭФЭР». URL: Режим доступа: firerobots.ru

² Горбань Ю.И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. М.: Пожнаука, 2013.

наружных установок — это наличие ветра, который отклоняет струю. Техническими решениями по европатенту 2599525 Automated FFC integrating a tv-system в извещатель пламени ИП 328/330-1-1 введена функция определения положения струи относительно очага загорания. Это позволяет проводить коррекцию наведения струи относительно расчетных данных определения координат баллистической траектории струи.

Были проведены исследования по распознаванию струи, которые определили принятые решения (рис. 7). На фото зеленым цветом выделены области, где имеются изменения по сравнению с фоном. Синим цветом показан результат аппроксимации верхней части контура (полиномом второй степени) с учетом влияния перспективы. Как видно, очертание синей кривой совпадает с баллистической траекторией струи. Данные о положении струи в сочетании с данными, получаемыми в ИК-диапазоне, позволяют корректировать углы наведения струи огнетушащего вещества (ОВВ) на очаг в реальном времени. Это дает возможность реализовать совершенно новые автоматические системы пожаротушения для наружных установок и применять безлюдные технологии, особенно важные для объектов в малонаселенных территориях Сибири и Севера.



Рис. 7. Оцифрованный видеокادر с идентификацией потока жидкости

Алгоритмы поведения пожарных роботов

Проведенная работа позволила создать новые цифровые умные продукты — пожарных роботов, кардинально изменивших подход к организации процесса тушения для водяных автоматических установок пожаротушения, положив в основу сочетание принципов автоматического управления в соответствии с заданным алгоритмом управления. В основу алгоритмов поведения пожарных роботов в условиях недетерминированной среды в меняющейся обстановке пожара заложены профессиональные наставления, характерные для пожарного дела. Это, по сути, программные установки — постулаты, апробированные на практике и подтвержденные патентами, которые представлены в виде тезисов с алгоритмами решения поставленных задач, озаглавленных, как и положено в боевой обстановке, короткими, как приказ, названиями. Данные по алгоритмам и программам их реализации приведены в таблице «Алгоритмы и программы».

От 3D-модели до цифрового производства

В настоящее время пожарных роботов выпускают серийно на заводе пожарных роботов «ЭФЭР» (рис. 8). Все подразделения «ЭФЭР» используют единое информационное пространство для организации цифрового производства, ведь не-

возможно создавать умные устройства — пожарных роботов — без постоянной автоматизации всех процессов — от разработки до производства. Производство оснащено современными станками с программным управлением, а цифровые двойники изделий доступны для совместной работы в PLM-системе, что значительно ускоряет операционное планирование.

В разработке сложных изделий участвуют инженеры разных специализаций: конструкторы, проектировщики, схемотехники, электронщики, программисты, технологи и экономисты, которые нуждаются в эффективных инструментах управления своими задачами для совместной работы над устройствами. В течение цикла производства изделий разработчики взаимодействуют между собой с помощью интегрированных друг с другом цифровых платформ, каждая из которых решает конкретные задачи специалистов. Проектный отдел согласовывает с заказчиком основные технические решения в наглядном конфигураторе, после чего создается проект будущей установки пожаротушения. Конструкторское бюро использует системы автоматического проектирования для создания моделей изделия и виртуального тестирования будущей конструкции. К инженерам-технологам поступают готовые данные о деталях для загрузки в станки с программным управлением. Экономисты в режиме реального времени получают данные для анализа себестоимости и трудозатрат.



Рис. 8. Завод пожарных роботов и ствольной техники

Алгоритмы и программы

№ п/п	Наименование алгоритма	Задачи и алгоритмы решения Комментарий	Наименование программы
1	Готовность к защите	100%-ная готовность к защите объекта. Обеспечивается надежностью и самотестированием всех элементов, с регистрацией событий на удаленном сервере с санкционированным доступом	Программа самотестирования и регистрации событий на сервере
2	Предупреждение о возможном загорании	Предупреждение о наличии аномально нагретых зон, предшествующем загоранию. Пожарный робот ведет наблюдение в ИК-диапазоне и при температуре, близкой к возгоранию, в местах вероятного нагрева (кабели, электрооборудование и др.) сообщает о месторасположении аварийного участка	Предупредительный мониторинг
3	Наведение по координатам	Основная задача пожарного робота: определение координат очага возгорания и тушение его струей. Координаты очага определяются по данным датчиков наведения в ИК- и УФ-диапазонах и расстояния. Струя наводится по специальному алгоритму на основе базы данных реальных траекторий струй	Базовая программа по определению координат очага загорания с учетом расстояния и баллистики струй
4	Раннее обнаружение, быстрое тушение	Определить очаг загорания в начальной стадии и тушить всем расходом (мечта пожарного). Для пожарного робота норма — обнаружить очаг загорания размером 0,1 м ² и тушить его всем расходом. При таком сосредоточении мощности потушить очаг в начальной стадии — решаемая задача	Поиск очага загорания и тушение струей сканированием по площади. Программа блиц-мониторинга
5	Контроль пожара	Следить за меняющейся пожарной обстановкой. Принимать меры соответственно развитию пожара	Программа контроля пожара
6	Целевое применение воды	Не подвергать объект защиты воздействию избыточной воды. При отсутствии горения тушение прекращается. Вода подается только в направлении огня, не причиняя ущерб от воздействия воды участкам, не подверженным действию огня	Программа отключения тушения при отсутствии горения. Программа селективной подачи воды
7	Контроль наведения на очаг	Контроль наведения струи относительно фактического расположения очага загорания. Наведение струи корректируется при ее отклонении от очага загорания из-за действия внешних факторов	Программа коррекции наведения по местоположению струи
8	Эффективное тушение	Тушить эффективной частью струи горящую поверхность очага. Эффективность тушения при циклическом тушении строчным сканированием струи по площади обеспечивается равномерностью подачи, определяемой правильно выбранным шагом сканирования, который приравнивается к размеру эффективной части струи с наиболее высокой интенсивностью	Программа оптимизации и контроля параметров тушения. Программа селективного тушения
9	Живучесть системы	Обеспечение работоспособности при пожаре. В экстремальных условиях пожарный робот может выйти из строя или частично потерять свои функции. Высокая живучесть: достигается 100%-ным резервированием с глубоким эшелонированием функциональных органов управления. На смену роботу, вышедшему из строя, приходит второй. При отказе автоматической системы производится переход на дистанционный режим, при отказе дистанционного — на ручной режим	Программная организация резервных режимов работы при отказах системы. Программа автоматического включения резервного пожарного робота.
10	Выбор приоритета	Приоритет команд человека над программными командами. В системе «человек — машина» человек — главный. Оператор при необходимости может взять управление на себя, перейдя в дистанционный режим, и его команды обязательны для робота	При разработке программ учитывается приоритет команд управления
11	Связь в пространстве и времени	Связь с роботом для контроля и перезагрузки. Возможность обновления программного обеспечения и сбора данных о стабильности работы системы через Интернет позволяет заводу-изготовителю и обслуживающей организации сохранять все рабочие функции установок в течение всего срока службы роботов	Программа удаленного доступа через Интернет и мобильную связь
12	Обеспечение нормативной интенсивности	Обеспечение нормативной интенсивности орошения, установленное Федеральным законом «О пожарной безопасности» ФЗ-123 для установок автоматического водопенного пожаротушения. Требование должно подтверждаться при программном тушении минимальной площади	Программа оптимизации и контроля параметров тушения



а



б



в



г

Рис. 9. Реализованные проекты: а — Петрозаводская ТЭЦ; б — стадион «Газпром Арена» в — космодром Восточный; г — завод «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы»

На защите объектов страны

Роботизированные установки пожаротушения нашли широкое распространение, защищая тысячи значимых объектов по всей стране (рис. 9), в том числе особо важных и социально значимых: стадионы «Газпром Арена» (Санкт-Петербург), «Лужники» (Москва), спортивно-тренировочный центр «Тамбов» (Тамбов); космодромы «Плесецк», «Восточный», аэропорты «Шереметьево», «Внуково», «Остафьево», «Минск»; промышленные объекты — заводы концерна «Алмаз-Антей»; объекты нефтегазового комплекса: нефтеперерабатывающие заводы Сызранский, Московский, Туапсинский, Ачинский и др., нефтяные платформы компании

«Лукойл», нефтяные морские терминалы в Бургасе и по проекту «Сахалин-1», объекты энергетики: Ленинградскую АЭС, Петрозаводскую и Барнаульскую ТЭЦ.

Хотелось бы отметить, что научно-технические достижения в пожарной робототехнике нашли широкую поддержку — как у специалистов пожарного дела, так и во многих отраслях промышленности, на защите которых стоят пожарные роботы. В 2020 году — в год столетия роботов — ведущие специалисты «Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» Ю.И. Горбань, В.Д. Мусийчук, С.Е. Сокольников стали лауреатами премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники».

© Ю.И. Горбань,

председатель Совета директоров

ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», академик НАНПБ

© С.Г. Немчинов,

генеральный директор

ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР»

Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени

© А.И. Кицак ✉

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь (Республика Беларусь, 220046, Минск, ул. Солтыса, 183а)

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в области порошкового пожаротушения существует ряд проблем, требующих углубленного изучения физики и технологии процесса тушения пожаров данными средами. Одним из путей поиска решения данных проблем является проведение анализа (теоретического, экспериментального) эффективности часто реализуемых на практике режимов тушения пожаров струйными системами порошкового пожаротушения, когда время взаимодействия огнетушащего порошка с горящим материалом близко к характерному времени протекания основных механизмов тушения — теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени.

Цель и задачи. Целью работы являлась оценка эффективности основных механизмов тушения пожара (теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени) в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных частиц продуктов горения.

Методы. Достижение поставленной цели осуществлялось методом теоретического моделирования механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка.

Результаты. Установлено, что тушение пламени огнетушащим порошком общего назначения в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерная длительность как передачи тепла частицам порошка, так и реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени. Сопоставление выполненных оценок характерного времени протекания реакций теплообмена и ингибирования широко распространенных в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожаров, что значительно снижает его вклад в результат тушения пожара при малых временах пребывания частиц порошка в зоне горения.

Выводы. Полученные результаты позволяют оптимизировать условия и режимы подачи огнетушащего порошка в зону горения с целью достижения максимального эффекта тушения, а также вести целенаправленный поиск новых огнетушащих порошковых сред с требуемыми теплофизическими характеристиками.

Ключевые слова: огнетушащий порошок; тепловое тушение; гетерогенное ингибирование; тепловая релаксация; длительность ингибирования

Для цитирования: Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99

✉ Кицак Анатолий Ильич, e-mail: kitsak48@yandex.ru

Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centres by powder particles

© Anatoly I. Kitsak ✉

Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (Soltysa St., 183a, Minsk, 220046, Republic of Belarus)

ABSTRACT

Introduction. Presently, there are several problems in the field of dry powder fire suppression that require the in-depth study of the physics and technology of fire suppression processes using these substances. One of the ways to find the solution to these problems is the efficiency analysis (theoretical and experimental) of frequently implemented fire extinguishing patterns involving fire suppression systems spraying dry powder, when the term of interaction between the dry fire extinguishing powder and the burning material is close to the duration of principal fire extinguishing patterns, or thermal and heterogeneous inhibition of active flame centres.

Purpose and objectives. The purpose of the work was to assess the efficiency of principal fire extinguishing patterns (thermal and heterogeneous inhibition of active flame centres) amid non-stable heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active combustion product particles by powder particles.

Methods. The pre-set objective was achieved through theoretical modeling of patterns of thermal fire extinguishing and heterogeneous inhibition of active flame centres by dry chemical powder particles.

Results. It was established that fire suppression with the help of general purpose dry chemical powder under non-steady conditions is the more effective, the smaller the effective size of powder particles, the longer the time of their stay in the combustion area and the shorter the characteristic period of heat transfer to powder particles and heterogeneous inhibition of active flame centres.

Conclusions. The results optimize conditions and patterns of dry fire extinguishing powder application to a combustion area to achieve the highest extinguishing effect and to conduct a targeted search for new dry chemical powders having pre-set thermal and physical specifications.

Keywords: dry chemical powder; thermal extinguishing; heterogeneous inhibition; thermal relaxation; inhibition time

For citation: Kitsak A.I. Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centres by powder particles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):89-99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99 (rus.).

✉ Anatoly Il'ich Kitsak, e-mail: kitsak48@yandex.ru

Введение

Порошковое пожаротушение целенаправленно применяется на практике уже более полувека. Большая востребованность порошков как огнетушащего материала обусловлена рядом их существенных преимуществ по сравнению с другими огнетушащими средствами [1–2].

Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается синергетическим действием ряда реализуемых в процессе тушения физических и химических механизмов тушения. Основными из них являются тепловой механизм тушения, обусловленный нагревом частиц порошка, и химический процесс ингибирования активных продуктов горения либо поверхностью частиц порошка (гетерогенное ингибирование), либо веществами, образующимися при их испарении или разложении в результате поглощения тепла (гомогенное ингибирование).

Исследованию огнетушащей способности порошков посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [3–10]. На основе данных исследований разработан ряд эффективных порошковых составов, способных потушить любой из известных классов пожаров.

Несмотря на большие успехи в технологии производства порошковых огнетушащих сред и внедрения их в практику, существует ряд факторов порошкового пожаротушения, требующих дальнейшего изучения физики и технологии тушения пожаров порошками. Одним из таких факторов является отсутствие единого представления о вкладе в резуль-

тат тушения пожара каждого из огнетушащих механизмов порошка. Однозначное понимание роли этих механизмов позволило бы в конкретных случаях тушения пожара заданного класса создать наиболее благоприятные условия его тушения.

В настоящее время предполагается, что доминирующим механизмом огнетушащего действия порошков является их способность ингибировать пламя пожара, в частности гетерогенное ингибирование, заключающееся в восстановлении на поверхности частиц порошка активных центров пламени, которыми являются свободные атомы и радикалы горючего вещества.

Одним из доказательств преобладания гетерогенного механизма ингибирования пламени над тепловым является зависимость эффективности тушения пожара от дисперсности частиц порошка. Отмечается, например, что, если бы доминировал тепловой механизм тушения пожара, то порошки с разной дисперсностью частиц мало бы отличались друг от друга по огнетушащей способности, хотя на практике различие между ними весьма заметное [1].

Другим фактором порошкового пожаротушения, требующим критического (с точки зрения особенностей взаимодействия частиц порошка с горючим материалом) анализа, является сильная зависимость результатов тушения пожара от условий применения порошка и режимов подачи его в зону пожара.

На зависимость результата тушения пожара порошком от условий подачи его в зону горения обращалось внимание в ряде работ [2, 11]. Однако, как

следует из литературных данных, попыток выяснения причин происходящего не предпринималось.

Анализ основных схем тушения пожара порошками показывает, что подача порошка в зону горения производится в большинстве случаев пневматическим способом. Он реализуется различными способами в модулях порошкового пожаротушения (МПП), ручных и переносных огнетушителях, а также лафетных установках порошкового пожаротушения.

Скорость частиц порошка, выбрасываемого из таких устройств, в газообразном горящем слое может достигать нескольких метров в секунду [2, 12]. При толщине слоя $\sim 0,1 \dots 0,2$ мм длительность t_{int} взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$ с [2]. В то же время нагрев частиц порошка и гетерогенный обрыв цепей горения не происходят мгновенно. По оценкам, приведенным в работе [1], длительность τ прерывания цепи (промежуток времени от момента появления активной частицы продукта горения до момента восстановления на поверхности частицы порошка) составляет $\sim 10^{-4}$ с.

Из сопоставления времени пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени и времени протекания основных механизмов тушения пожара следует, что они примерно одного порядка. Поэтому можно предположить, что процесс тушения пожара огнетушащим порошком с применением установок пожаротушения со струйной подачей порошка во фронт пламени часто происходит в нестационарных условиях.

Целью настоящей работы является оценка эффективности основных механизмов тушения пожара — теплового и гетерогенного ингибирования активных центров пламени в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных частиц продуктов горения.

Физическая модель тушения пожара струйными устройствами подачи огнетушащего порошка в зону горения

Рассмотрим схему тушения пожара струей огнетушащего порошка, подаваемой в зону горения по направлению к фронту пламени.

В некоторый момент времени в этой зоне, которая состоит из областей подогрева горючей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Этот слой за промежуток времени t_{int} , зависящий от скорости частиц порошка и эффективной толщины зоны реакции, покинет ее. Частицы слоя безвозвратно покидают реакционную область, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). При ту-

шении ЛВЖ частицы порошка проходят через зону реакции и могут проникнуть внутрь жидкости, а затем всплыть на поверхность горения. В этом состоянии их огнетушащая способность будет проявляться в экранировании поверхности ЛВЖ от воздействия тепла пламени, способствуя ее охлаждению.

Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившихся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, может отразиться от материала, снова попасть в реакционную область горения или покинуть ее.

За время пребывания частиц порошка в реакционной области они нагреваются до определенной температуры в соответствии с их теплофизическими и дисперсными характеристиками и адсорбируют на своей поверхности с некоторой вероятностью, зависящей от физико-химических характеристик материала и состояния их поверхности, активные центры пламени, состоящие из свободных атомов и радикалов горючего вещества.

Нагрев частиц порошка приводит к проявлению двух условных форм теплового механизма тушения пожара: охлаждению зоны горения за счет увеличения теплоотвода от горючего вещества и уменьшению теплоотдачи от него. Первая из этих форм реализуется при расходе тепла, поглощенного частицами порошка, на их расплав и отдачу тепла путем теплопередачи в окружающую среду. Вторая форма теплового механизма тушения пожара выражается в терморазложении частиц порошка на составляющие компоненты, которые затем связывают (ингибируют) активные центры пламени и таким образом снижают теплоотдачу горючего материала.

Адсорбированные поверхностью частиц порошка активные центры пламени рекомбинируют с другими активными частицами пламени, достигшими этой поверхности. В результате формируются неактивные частицы (молекулы) из родственных или неродственных атомов или радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в конечном результате к снижению тепловыделения.

Реакция гетерогенного ингибирования активных центров пламени осуществляется в каналах слоя, образованных частицами огнетушащего порошка.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени t_{int} больше, чем характерные времена протекания реакции ингибирования активных центров пламени τ_{ing} и нагрева частиц порошка τ_{rel} , то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибиро-

ние активных центров пламени равно, как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, т.е. частицы успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреться до максимальных температур. Тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

Если же частицы порошка находятся в зоне реакции ограниченное время, такое, что $t_{int} \leq \tau_{ing}$ и $t_{int} \leq \tau_{rel}$, то эффективность ингибирования и нагрева частиц, очевидно, будет зависеть от соотношения времени t_{int} и τ_{ing} , а также t_{int} и τ_{rel} .

Модель теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена

Определим количество теплоты Q , аккумулированной частицами порошка за время их пребывания в зоне горения t_{int} . Для этого вначале найдем закон изменения температуры частицы порошка во времени t при ее попадании во фронт пламени.

Воспользуемся для этого одним из упрощенных подходов к решению задач теплопроводности, относящимся к случаю, когда поле температур в твердом теле изменяется во времени, но в любой момент времени не изменяется в пространстве. Данный случай реализуется при передаче тепла телу от нагретого слоя горящего газа путем конвекции, если сопротивление теплопроводности в теле намного меньше сопротивления конвекции на его поверхности [13].

Математически это условие выражается в том, что число Био Bi , которое равно отношению кондуктивного термического сопротивления к конвективному термическому сопротивлению, должно быть намного меньше единицы [13], т.е.

$$Bi = \frac{h_c d_p}{\lambda_p} \ll 1, 0, \quad (1)$$

где h_c — средний коэффициент конвективной теплопередачи на поверхности раздела теплового слоя и твердого тела, Вт/(м²·К);

d_p — характерный размер тела, м;

λ_p — коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

Параметр h_c можно оценить из соотношения для числа Нуссельта Nu при теплопередаче от нагретого слоя газа частице порошка [2]. Имеем:

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda_g}, \quad (2)$$

где λ_g — коэффициент теплопроводности горящего газа.

Число Нуссельта для тел очень малого размера примерно равно 2 [2].

Проведенные оценки чисел Био для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ($\lambda_p = 4$ Вт/(м·К) [11]) и моноаммо-

нияфосфата ($\lambda_p = 0,25$ Вт/(м·К) [11]) показали, что при $d_p = 50$ мкм и средней теплопроводности нагретого (~ 700 °С) газа (воздуха) $\lambda_g = 6,71 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К) они равны 0,033 и 0,53 соответственно. Видно, что условие (1) выполняется для частиц бикарбоната натрия с более высокой точностью, чем для частиц моноаммонияфосфата. Будем считать, что неравенство (1) выполняется условно для частиц обоих рассматриваемых сортов огнетушащих порошков.

В этом случае, для определения зависимости изменения температуры частицы во времени при нахождении ее в зоне горения можно воспользоваться законом баланса энергии между аккумулированной частицей и энергией, подводимой к поверхности частицы из зоны горения. Математически этот закон представляется в виде [13]:

$$\rho V c_p \frac{dT(t)}{dt} = q(t), \quad (3)$$

где ρ — плотность материала частицы, кг/м³;

V — объем частицы порошка, м³;

c_p — удельная теплоемкость частиц порошка, Дж/(кг·К);

$T(t)$ — мгновенное значение температуры частицы, К;

$q(t) = h_c A_s (T_g - T(t))$ — мгновенный тепловой поток, передаваемый частице порошка горячим газом температурой T_g , К;

A_s — площадь поверхности частицы, м².

Решая уравнение (3) относительно $T(t)$ при условии, что в начальный момент времени $t = 0$ температура частицы равна T_p , получим следующее соотношение для мгновенного значения температуры частицы:

$$T(t) = T_g + (T_p - T_g) \exp \left[-\frac{h_c}{\rho d_p c_p} t \right], \quad (4)$$

где $d_p = V/A_s$ — характерный геометрический размер частиц порошка, м.

Определим количество тепла Q , аккумулированное частицами порошка за время пребывания их в зоне горения t_{int} . Для этого проинтегрируем выражение $q(t)$ в пределах от 0 до t_{int} с учетом (4).

В итоге получим:

$$Q = m c_p (T_g - T_p) \left(1 - \exp \left[-Bi \frac{t_{int}}{\tau_{rel}} \right] \right), \quad (5)$$

где m — масса частиц порошка, находящихся в зоне горения в течение времени взаимодействия, кг;

$Bi = h_c d_p / \lambda_p$ (λ_p — коэффициент теплопроводности материала частиц, Вт/(м·К));

$t_{int} = \frac{l_{int}}{v}$ (l_{int} — эффективная длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м);

v — скорость частиц в реакционной зоне, м/с;
 $\tau_{rel} = d_p^2/\alpha$ — характерное время нагрева (остывания) материала частиц порошка, с;
 $\alpha = \lambda/c_p\rho$ — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Количество тепла Q_{ext} , поглощенное частицами порошка за время выпуска порошка τ_{ext} (время тушения), равно:

$$Q_{ext} = Jc_p(T_g - T_p) \times \left(1 - \exp\left[-Bi \frac{t_{int}}{\tau_{rel}}\right]\right) S_{ext} t_{ext}, \quad (6)$$

где $J = G/S_{ext}$ — интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/(м²с);

G — массовый расход порошка, кг/с;

S_{ext} — площадь тушения пожара, м².

Проведем анализ эффективности отбора тепла частицами огнетушащего порошка из зоны горения.

Из выражения (6) следует, что количество тепла, аккумулированного частицами порошка, зависит в общем случае как от их теплофизических характеристик, так и от дисперсности (характерных размеров) частиц и условий подачи порошка в зону горения. Зависимость эффективности теплового механизма тушения пожара от характерных размеров частиц огнетушащего порошка проявляется через зависимость от них параметра τ_{rel} . Параметр τ_{rel} характеризует скорость нагрева (остывания) материала частиц порошка. Из его определения следует, что скорость нагрева частиц порошка тем больше, чем меньше их характерные размеры, теплоемкость и плотность вещества, из которого они состоят, и чем больше теплопроводность.

Как следует из (6), для эффективного охлаждения зоны горения необходимо, чтобы время нахождения частиц в этой зоне t_{int} было больше времени τ_{rel} .

Определим время τ_{rel} для упомянутых выше типов огнетушащих порошков: бикарбоната натрия ($c_p = 1030$ Дж/кг·К; $\rho = 2020$ кг/м³; $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К) [11]) и моноаммонияфосфата ($c_p = 1234$ Дж/кг·К; $\rho = 1803$ кг/м³; $\lambda = 0,025$ Вт/(м·К) [11]).

Для частиц размером $d_p \sim 50$ мкм значения τ_{rel} равны 1,3 и 22 мс соответственно. С учетом числа Био, входящего в экспоненциальный множитель (6), значение t_{int} для эффективной передачи тепла должно быть больше 39 мс для частиц бикарбоната натрия и 42 мс для частиц моноаммонияфосфата.

Модель механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка при нестационарном взаимодействии

Определим концентрацию C активных частиц реакции горения, адсорбированных поверхностью частиц слоя огнетушащего порошка.

Для этого воспользуемся приближенным методом решения задач диффузионной кинетики, получившим название метода равнодоступной поверхности [14].

Следуя данному методу, запишем уравнение равенства потока $j(C)$ активных частиц пламени, восстанавливаемых на поверхности частицы порошка, потоку активных частиц, доставляемых к этой поверхности в результате образовавшейся разности концентраций частиц возле поверхности ингибитора и внутри горючего газа, с учетом конечности времени ингибирования активных центров τ_{ing} .

Получим:

$$j(C) = \beta(C - C_0) - \tau_{ing} \frac{dj(C)}{dt}, \quad (7)$$

где $C_0 = m_0/V$ — концентрация активных частиц, кг/м³;

m_0 — начальная масса активных частиц в слое горючего газа, кг;

V — объем горячего слоя газа, м³;

β — коэффициент массоотдачи, м/с.

Предположим, что реакция ингибирования на поверхности является реакцией первого порядка:

$$j(C) = kC, \quad (8)$$

где k — кинетическая константа скорости реакции, м/с.

Проинтегрировав (7) с учетом (8) при условии постоянства коэффициентов β и k (квазистационарный режим реакции) и того, что в начальный момент времени $t = 0$ концентрация ингибированных центров пламени $C = 0$, получим следующее уравнение для концентрации центров пламени, восстановленных на поверхности частицы порошка в заданный момент времени t :

$$C = \frac{\beta}{\beta + k} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right)\right) C_0, \quad (9)$$

где $\Delta\tau = \tau_{ing} k/(k + \beta)$ — эффективное время обрыва цепи горения, с.

Для скорости реакции ингибирования dm/dt (массы активных частиц, восстанавливаемых в единицу времени) получим следующее уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = kS_{ch}C = K^*S_{ch}C_0, \quad (10)$$

где S_{ch} — эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами огнетушащего порошка в слое объемом V , м²;

K^* — эффективная константа скорости реакции, равная:

$$K^* = \frac{k\beta}{\beta + k} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right)\right). \quad (11)$$

За время взаимодействия τ_{ing} масса m активных центров пламени, ингибированных поверхностью слоя частиц площадью S_{ch} , будет равна:

$$m = \frac{k\beta}{\beta + k} S_{ch} C_0 \Delta\tau \left(\frac{t_{int}}{\Delta\tau} - \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\Delta\tau}\right) \right) \right). \quad (12)$$

Проведем анализ полученной зависимости массы ингибированных центров пламени от условий тушения пожара.

Из (12) видно, что при стационарном взаимодействии активных центров пламени с поверхностью частицы, т.е., когда $t_{int} \gg \Delta\tau$, масса ингибированных центров пламени стремится к максимально возможному значению за интервал времени t_{int} [1].

Если время взаимодействия $t_{int} \ll \Delta\tau$, то масса ингибированных центров пламени будет стремиться к минимально возможному значению, при том же значении $\Delta\tau$.

Выразим соотношение для m через кинетические параметры реакции ингибирования, дисперсные характеристики частиц огнетушащего порошка и параметры подачи его в зону пламени.

Из фундаментальной работы [15] известно, что кинетическая константа скорости k равна:

$$k = \frac{1}{4} \gamma u, \quad (13)$$

где γ — вероятность адсорбции активных частиц поверхностью дисперсной частицы;

u — средняя тепловая скорость активной частицы, м/с.

Коэффициент массоотдачи β к поверхности частицы ингибирования определяется выражением [14]:

$$\beta = \frac{Nu_d D}{d_{eq}}, \quad (14)$$

где Nu_d — критерий Нуссельта для процесса диффузии;

D — коэффициент диффузии, м²/с;

d_{eq} — эквивалентный диаметр каналов слоя, в которых происходит гетерогенная реакция, м.

Величину d_{eq} можно выразить через характеристики дисперсного слоя огнетушащих частиц. Согласно [16] имеем:

$$d_{eq} = \frac{2F\epsilon d_p}{3(1-\epsilon)}, \quad (15)$$

где F — фактор формы частиц (для шарообразных частиц $F = 1$);

$\epsilon = (V - V_0)/V = 1 - \rho_n/\rho_p$ — порозность слоя;

V — общий объем, занимаемый слоем частиц порошка, м³;

V_0 — объем, занимаемый частицами порошка в слое, м³;

ρ_n — насыпная плотность частиц порошка, кг/м³;

ρ_p — истинная плотность частиц порошка, кг/м³;

d_p — диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м.

Эффективная площадь S_{ch} поверхности каналов, образованных частицами слоя [16]:

$$S_{ch} = SH \frac{6(1-\epsilon)}{Fd_p}, \quad (16)$$

где S — площадь основания слоя дисперсных частиц в толще горючего газа, м²;

H — высота слоя, м.

Известно [14, 15], что при протекании гетерогенной реакции наблюдаемая скорость реакции определяется, с одной стороны, истинной химической кинетикой на поверхности, а с другой — скоростью транспорта реагирующих веществ к этой поверхности посредством молекулярной или конвективной диффузии. Если скорость реакции определяется в основном кинетическими процессами на поверхности ингибитора, отмечают, что реакция происходит в кинетической области. Другой предельной областью протекания гетерогенной реакции является диффузионная область. В этой области скорость реакции лимитируется процессом диффузии активных частиц к поверхности ингибитора.

Определим относительные массы ингибированных центров пламени в указанных областях протекания реакции ингибирования.

Кинетическая область. Реакция в этой области протекает, когда вероятность адсорбирования γ атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, т.е. $\gamma \ll 1$ [15]. При этом активная частица до своего уничтожения может успеть много раз побывать как у поверхности, так и в середине канала слоя частиц, где происходит реакция. В этом случае концентрацию активных центров пламени можно считать приближенно постоянной во всем объеме горючего газа, и скорость обрыва цепей горения не будет зависеть от скорости диффузии активных центров к поверхности ингибитора.

В данном режиме реакции кинетическая константа скорости $k \ll \beta$, а время реакции ингибирования τ_{ing} будет определяться величиной, обратной константе скорости обрыва цепи [15], т.е.

$$\tau_{ing} = \frac{d_{eq}}{\gamma u}. \quad (17)$$

Используя определения (13)–(17), получим из (12) следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени в кинетической области протекания реакции ингибирования за время подачи порошка в зону горения τ_{ext} :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3}{2} J \gamma u \frac{1}{F d_p v \rho_p} \times \Delta \tau \left(\frac{t_{int}}{\Delta \tau} - \left(1 - \exp \left(- \frac{t_{int}}{\Delta \tau} \right) \right) \right) \frac{t_q}{t_{int}}, \quad (18)$$

где $J = G/S_q$ — интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/м²с;

$G = m/t$ — массовый расход частиц порошка, кг/с;

S_q — площадь тушения пожара, м²;

v — скорость частиц порошка в зоне пожара, м/с;

$\Delta \tau = \tau_{ing} k/\beta$ — эффективное время длительности реакции ингибирования, равное:

$$\Delta \tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{Nu_d D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (19)$$

В случае диффузии активных частиц в неподвижной среде $Nu_d \sim 1$ [15].

Диффузионная область. В этой области реакция протекает, когда $\gamma \approx 1$, т.е., когда активная частица гибнет при первом же столкновении с поверхностью ингибитора. Скорость обрыва цепи лимитируется диффузией атома или радикала к поверхности ингибитора. Концентрация атомов или радикалов на поверхности частиц порошка близка к нулю и максимальна в центре канала реакции. В данных условиях коэффициент массоотдачи $\beta \ll k$, а время длительности ингибирования будет определяться временем диффузии τ активных центров к поверхности ингибитора.

Время диффузии можно оценить из соотношения Эйнштейна $4D\tau = d_{eq}^2$ [15].

Из чего следует:

$$\tau_{ing} = \frac{d_{eq}^2}{4D}. \quad (20)$$

Учитывая особенности протекания реакции ингибирования в диффузионной области, получим следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени за время τ_{ext} :

$$\frac{m}{m_0} = 9J \frac{Nu_d D}{F^2 d_p^2 v \rho_p} \left(\frac{\rho_n}{\rho_p - \rho_n} \right) \times \Delta \tau \left(\frac{t_{int}}{\Delta \tau} - \left(1 - \exp \left(- \frac{t_{int}}{\Delta \tau} \right) \right) \right) \frac{t_q}{t_{int}}, \quad (21)$$

где $\Delta \tau = \tau_{ing}$ и с учетом (20) равно:

$$\Delta \tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (22)$$

Из полученных выражений для относительных масс ингибированных активных частиц в кинетической и диффузионной области протекания реакции ингибирования следует, что эффективность ингибирования определяется не только дисперсными

характеристиками огнетушащего порошка и кинетическими параметрами активных центров, но и условиями тушения. Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время взаимодействия t_{int} их с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования $\Delta \tau$.

Длительность реакций ингибирования $\Delta \tau$ в различных областях их протекания, как следует из формул (19) и (22), практически одинакова. Причем эффективное время реакции ингибирования тем меньше, чем меньше диаметр частиц порошка, чем больше скорость диффузии активных центров пламени к поверхности ингибитора и чем меньше порозность частиц огнетушащего порошка в зоне горения.

Оценки величины $\Delta \tau$ для атома кислорода с молярной массой $\mu = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и диаметром $1,5 \cdot 10^{-10}$ м показали, что она составляет $\Delta \tau = 3,8 \cdot 10^{-5}$ с при атмосферном давлении $P = 10^5$ Па, температуре в зоне горения $T = 973$ К, диаметре частиц огнетушащего порошка $d_p = 50$ мкм и порозности $\varepsilon = 0,9$. При порозности частиц $\varepsilon = 0,5$ — $\Delta \tau = 4,7 \cdot 10^{-7}$ с. В случае использования для тушения пожара порошка с диаметром частиц $d_p = 10$ мкм и порозности $\varepsilon = 0,9$ величина $\Delta \tau = 1,52 \cdot 10^{-6}$ с, а при $\varepsilon = 0,5$ длительность реакции ингибирования составляет $\Delta \tau = 1,88 \cdot 10^{-8}$ с.

Из полученных оценок $\Delta \tau$ следует, что для эффективного гетерогенного ингибирования атомов кислорода частицами порошка их скорость v при диаметре $d_p = 50$ мкм, порозности в зоне реакции $\varepsilon = 0,9$ и $l_{int} = 200$ мкм должна быть меньше 5 м/с, а при $\varepsilon = 0,5$ — $v < 420$ м/с. При диаметре частиц огнетушащего порошка $d_p = 10$ мкм и $\varepsilon = 0,5$ процесс гетерогенного ингибирования атомов кислорода происходит фактически в стационарном режиме.

Анализ основных закономерностей тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени

Проведенные оценки эффективности основных механизмов тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени позволили выяснить вклад этих механизмов в результат тушения пожара и зависимость этого результата от условий подачи порошка в зону горения.

Выявлено, что эффективность механизма теплового тушения пожара, как и механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени, зависит от характерных размеров частиц порошка d_p . Эта зависимость проявляется, прежде всего, через зависи-

мость характеристик инерционности этих процессов τ_{rel} и Δt от d_p .

Как следует из соотношений для параметров τ_{rel} и Δt инерционность рассматриваемых механизмов тушения тем меньше, чем меньше характерный размер d_p частиц порошка.

Для струйных систем порошкового тушения пожара чем меньше инерционность механизмов тушения пожара, т.е. чем ближе процесс тушения пожара к стационарному режиму, тем с большей скоростью можно подавать частицы порошка в зону горения и тем эффективнее (быстрее и надежнее) происходит ликвидация пожара.

Сопоставление приведенных оценок τ_{rel} для частиц двух приведенных выше типов огнетушащих порошков и Δt , рассчитанных при тех же значениях характерных размеров частиц ($d_p = 50 \dots 10$ мкм), показывают, что при скоростях частиц порошка в зоне горения больше 0,24 м/с и толщине горючего слоя $l_{int} = 200$ мкм механизм теплового тушения пожара может вообще не проявляться. В этом случае соответственно не осуществляется эффективный отбор тепла из зоны горения, не происходит гомогенное ингибирование активных центров пламени и не образуется пленка расплава порошка при тушении пожара подкласса А1. Процесс тушения пожара будет происходить преимущественно благодаря протеканию процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени вследствие его меньшей инерционности.

Установленная зависимость скорости реакции гетерогенного ингибирования активных частиц пламени от скорости частиц огнетушащего порошка в зоне реакции позволяет объяснить иногда проявляющуюся низкую эффективность МПП импульсного типа (время выброса порошка $t_{dis} \leq 1$ с), применяемых, например, при тушении пожара подкласса А1 по сравнению с МПП кратковременного действия ($t_{dis} = 1 \dots 10$ с) при одинаковой высоте расположения их над очагом пожара и одинаковым направлением струй во фронт пламени.

Сравнительно низкая эффективность установок порошкового пожаротушения импульсного типа обусловлена малым временем пребывания частиц порошка в реакционной зоне вследствие их большой скорости, которая может достигать десятков метров в секунду. При таких скоростях, как правило, успевает произойти тушение пламенного горения (осуществляется в основном при протекании реакции гетерогенного ингибирования), однако гетерогенное горение материала не удается потушить из-за большей инерционности теплового механизма тушения, ответственного за образование изолирующей пленки на поверхности горючего материала.

Несмотря на то что скорости частиц порошка, выбрасываемых в зону пожара МПП кратковременного действия, могут быть примерно такой же величины, эффективный удельный расход порошка такими модулями на тушение пожара больше эффективного удельного расхода порошка МПП импульсного типа благодаря большему на порядок времени выброса (времени тушения) порошка в зону пожара. За это время может образоваться (нараститься) пленка, препятствующая образованию горючей смеси.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) МПП подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени больше, чем характерное время протекания реакции ингибирования активных центров пламени и нагрева частиц порошка, то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибирование активных центров пламени, равно, как и нагрев частиц порошка, будет происходить наиболее эффективно, т.е. частицы порошка будут успевать ингибировать максимальное число центров пламени и нагреваться до максимальных температур. Тушение пожара будет происходить в благоприятных условиях.

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, заключающегося в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения [17–19]. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости частиц порошка при увеличении интенсивности подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара вследствие сокращения времени теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Уменьшение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответственно, увеличению удельного расхода огнетушащего порошка.

Данный вывод хорошо иллюстрируется приведенными на рисунке расчетными зависимостями средней скорости v частиц порошка в зоне горения и времени t_q тушения пожара класса В ранга 8В (согласно СТБ 11.13.04-2009) от интенсивности подачи порошка в зону горения.

Кривые построены в предположении, что основной вклад в результат тушения пожара вносит механизм гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка. Расчет времени тушения в зависимости от интенсивности подачи порошка в зону горения производился для кинетической области протекания реакции ингибирования частиц атома кислорода, исходя из соотношения (18) и условия, что критерием тушения пожара является равенство $m/m_0 = 1$.

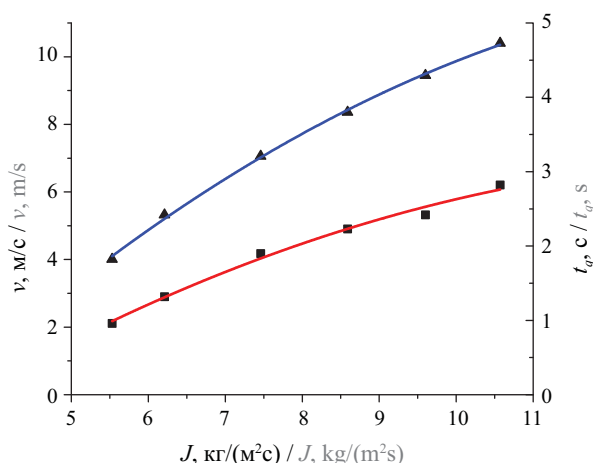


Рис. 1. Зависимости средней скорости частиц огнетушащего порошка v (▲) в зоне горения и времени t_q (■) тушения пожара от средней интенсивности J подачи порошка в зону горения

Fig. 1. Dependences between average dry chemical powder particle velocity v (▲) in the combustion area and fire suppression time t_q (■) on average intensity J of the dry chemical powder application to a combustion area

Расчетные параметры принимались следующими: $d_p = 50$ мкм; $\gamma = 10^{-3}$; $\varepsilon = 0,9$; $\Delta\tau = 3,8 \cdot 10^{-5}$ с; $u = 1,13 \cdot 10^3$ м/с; $l_{int} = 200$ мкм; $\rho_p = 1920$ кг/м³; $F = 1$. Условное тушение пожара осуществлялось модульной установкой порошкового пожаротушения с модулем, расположенным на высоте 2,4 м от поверхности горючей жидкости и имеющим диаметр выходного отверстия, равный 24 мм. Изменение интенсивности подачи порошка в зону пожара осуществлялось подачей в зону горения различных навесок порошка (0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 кг) сжатым воздухом под постоянным давлением, равным 0,7 МПа. При расчете средней скорости частиц v использовались соотношения работы [12].

Из рис. 1 видно, что с увеличением интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения растет скорость частиц порошка в этой зоне. Увеличение скорости частиц порошка приводит к уменьшению времени взаимодействия частиц порошка с активными частицами пламени. Вследствие этого и конечности времени протекания реакции ингибирования происходит уменьшение числа ингибированных центров пламени частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции. В результа-

те растет время тушения пожара t_q и соответственно удельный расход порошка на тушение пожара.

Зависимость эффективности тушения пламени от эффективной длительности взаимодействия (времени взаимодействия t_{int}) их с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [20], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения.

Выводы

Получены теоретические зависимости количества тепла, поглощаемого частицами огнетушащего порошка, и скорости реакции гетерогенного ингибирования ими активных центров пламени в нестационарных условиях теплопередачи и протекания реакции ингибирования для струйных систем порошкового пожаротушения.

Проведены оценки эффективности механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в данных условиях.

Установлено, что эффективность как теплового механизма тушения пожара, так и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарном режиме их реализации, зависит от дисперсных характеристик частиц порошка и соотношения времени пребывания их в зоне горения и характерной длительности теплопереноса и реакции ингибирования.

Тушение пламени огнетушащим порошком в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерные длительности теплопередачи и реакции ингибирования.

Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его вклад в результат тушения пожара при малом времени пребывания частиц порошка в зоне горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 363 с.
2. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2012. Т. 21. № 4. С. 60–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17821706>

3. Dexu D., Xuhai P., Min H. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. Pp. 142–148. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126
4. Guomin Z., Guangji X., Shuang J., Qingsong Z., Zhongxian L. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures // *International Journal of Chemical Engineering*. 2019. No. 4. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/2474370
5. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder // *Fire Science*. 2011. Vol. 20. No. 4. Pp. 200–205. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-HZKX201104005.htm
6. Chung-Hwei S., Chan-Cheng C., Horng-Jang L., Shiuan-Cheng W. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 84. Pp. 485–490. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.459.
7. Ye Y., Zhivue H., Lingshuang Z., Zhiming D., Xiaomin C. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K–powder fire extinguishing agent // *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42. Pp. 336–344. DOI: 10.1002/fam.2500.
8. Hangchen L., Dexu D., Xinxin G., Min H., Xuhai P. Experimental study on the optimum concentration of ferrocene in composite ultrafine dry powder // *Fire Technology*. 2020. Vol. 56. Pp. 913–936. DOI: 10.1007/s10694-019-00912-x
9. Gurchumelia L., Bezarashvili G., Tsanava R. Thermal inhibition of flame propagation // *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 13. No. 3. Pp. 50–53. URL: http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08_Gurchumelia.pdf
10. Ye Y., Zhiming D., Zhivue H. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for Class B fires // *Fire and Materials*. 2019. Vol. 43. Pp. 84–91. DOI: 10.1002/fam.2671
11. Краснянский М.Е. Порошковая пожаровзрывозащита. Донецк : Общество книголюбых, 1994. 152 с.
12. Кицак А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения // *БіТр. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza/Safety & Fire Technique*. 2018. Vol. 49 (1). Pp. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7
13. Kreith F., William Z. Blac. Basic Heat Transfer. New York : Harper & Row, 1980. 512 p.
14. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987. 502 с.
15. Семенов Н.Н. Цепные реакции. М. : Наука, 1986. 535 с.
16. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
17. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф., Власов Н.А. Эффект огнепреграждения при оценке огнетушащей способности порошковых составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2015. Т. 24. № 10. С. 67–72. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.67-74
18. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2014. Т. 23. № 11. С. 84–87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23377994>
19. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2016. Т. 25. № 3. С. 67–73. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76
20. Баланюк В.М. Определение эффективности тушения огнетушащими аэрозолями горючих жидкостей на открытом пространстве // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 5. № 10 (77). С. 4–10. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399

REFERENCES

1. Baratov A.N. *Combustion – Fire – Explosion – Safety*. Moscow, FGU VNIPO MCHS ROSSII, 2003; 364. (rus.).
2. Abduragimov I.M. About mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(2):52-56. (rus.).
3. Dexu D., Xuhai P., Min H. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. *Procedia Engineering*. 2018; 211:142-148. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.126
4. Guomin Z., Guangji X., Shuang J., Qingsong Z., Zhongxian L. Fire-extinguishing efficiency of superfine powders under different injection pressures. *International Journal of Chemical Engineering*. 2019; 4:1-7. DOI: 10.1155/2019/2474370

5. Huang X., Liu L., Zhou X. Experimental study on fire-extinguishing performance of ammonium phosphate subnanometer powder. *Fire Science*. 2011; 20(4):200-205. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-HZKX201104005.htm
6. Chung-Hwei S., Chan-Cheng C., Horng-Jang L., Shiu-Cheng W. The assessment of fire suppression capability for the ammonium dihydrogen phosphate dry powder of commercial fire extinguishers. *Procedia Engineering*. 2014; 84:485-490. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.459
7. Ye Y., Zhivue H., Lingshuang Z., Zhiming D., Xiaomin C. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent. *Fire and Materials*. 2018; 42:336-344. DOI: 10.1002/fam.2500
8. Hangchen L., Dexu D., Xinxin G., Min H., Xuhai P. Experimental study on the optimum concentration of ferrocene in composite ultrafine dry powder. *Fire Technology*. 2020; 56:913-936. DOI: 10.1007/s10694-019-00912-x/
9. Gurchumelia L., Bezarashvili G., Tsanova R. Thermal inhibition of flame propagation. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2019; 13(3):50-53. URL: http://science.org.ge/bnas/t13-n3/08_Gurchumelia.pdf
10. Ye Y., Zhiming D., Zhivue H. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for Class B fires. *Fire and Materials*. 2019; 43:84-91. DOI: 10.1002/fam.2671
11. Krasnyansky M.E. *The Powder fire and explosion protection*. Donetsk, Society of book lovers, 1994; 152. (rus.).
12. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into combustion zone. *BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza/Safety & Fire Technique*. 2018; 49(1):76-75. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7 (rus.).
13. Kreith F., William Z. Blac. *Basic Heat Transfer*. New York, Harper & Row, 1980; 512.
14. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 502. (rus.).
15. Semenov N.N. *Chain reaction*. Moscow, Nauka, 1986; 535. (rus.).
16. Kasatkin A.G. *Basic processes and devices of chemical technology*. Moscow, LLC TID "Alliance", 2004; 753. (rus.).
17. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F., Vlasov N.A. Effect of fire obstruct for assessment of fire extinguishing ability of powder structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(10):67-72. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.67-74 (rus.).
18. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(11):84-87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23377994> (rus.).
19. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(3):67-73. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76 (rus.).
20. Balanyk V.M. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Vostochno-Evropejski jurnal peredovih tehnologiy/Eastern European journal of advanced technologies*. 2015; 10(77):4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399 (rus.).

Поступила 24.08.2020, после доработки 23.09.2020;

принята к публикации 05.10.2020

Received August 24, 2020; Received in revised form September 23, 2020;

Accepted October 5, 2020

Информация об авторе

КИЦАК Анатолий Ильич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 343265, ORCID: 0000-0002-7116-8156; e-mail: kitsak48@yandex.ru

Information about the author

Anatoly I. KITSACK, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of Department of Automatic Means of Detection and Elimination of Emergencies, Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 343265, ORCID: 0000-0002-7116-8156; e-mail: kitsak48@yandex.ru

УДК 621.316.9/614.8

Оценка риска в проектировании систем молниезащиты зданий и сооружений

© А.С. Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена возможность применения оценки риска при молниезащите для целей обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений. Показаны примеры ограниченной гибкости применения существующих нормативных требований к молниезащите объектов. Отмечена необходимость внедрения современных методов оценки риска при проектировании систем молниезащиты. Выполнены анализ и описание методики определения отдельных компонентов риска гибели людей при непосредственном ударе молнии в объект и/или возникновении пожара (взрыва). Приведены основные достоинства и недостатки существующей методики оценки риска и пути ее совершенствования.

Ключевые слова: удар молнии; пожар; взрыв; гибель человека; опасное событие; расчет вероятности

Для цитирования: Харламенков А.С. Оценка риска в проектировании систем молниезащиты зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 100–104.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Risk assessment in the design of lightning protection systems of buildings and structures

© Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

The possibility of using risk assessment in lightning protection for the purposes of ensuring fire safety of buildings and structures is considered. Examples of limited flexibility of application of existing regulatory requirements for lightning protection of facilities are shown. The need to introduce modern methods of risk assessment in the design of lightning protection systems is noted. Analysis and description of the methodology for determining the individual components of the risk of death of people with a direct lightning strike into an object and/or the occurrence of a fire (explosion) is performed. The main advantages and disadvantages of the existing risk assessment method and ways of its improvement are given.

Keywords: lightning strike; fire; explosion; death of a person; dangerous event; calculating the probability

For citation: Kharlamenkov A.S. Risk assessment in the design of lightning protection systems of buildings and structures. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):100-104. (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС:

В рубрике «Вопрос – Ответ» № 6 журнала за 2019 г. [1] и № 1, 2 за 2020 г. [2, 3] были рассмотрены существующие технические решения молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий (внешняя и внутренняя молниезащита). Представленное многообразие способов защиты объектов с применением активных молниеприемников и устройств нейтрализации прямого удара молнии (зеленая молниезащита), а также организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности производственных про-

цессов в условиях грозовой активности (превентивная молниезащита) указывает на тесную связь системы молниезащиты с системой обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений. Применение обеих систем преследует одну цель — защиту людей и имущества от опасных и негативных воздействий природного и техногенного характера в повседневной жизни и при возникновении чрезвычайных ситуаций. Очевидно, что отсутствие молниезащиты на объекте ведет к повышению его пожарной опасности. Это утверждение особенно актуально как для объектов индивидуального жилищного

строительства (ИЖС), так и для промышленных зданий и сооружений, расположенных в местах с низкой плотностью застройки и имеющих пожар- и взрывоопасные производства.

Отдельного рассмотрения требуют случаи размещения объектов защиты в пределах городской черты. Многие специалисты соглашаются с тем, что принятые меры по защите от ударов молнии отдельных зданий и сооружений могут являться избыточными при наличии вблизи них более высоких строений, имеющих свою систему молниезащиты. Но такой вариант не рассматривается в действующих нормативных документах по молниезащите, а значит, требует более детального изучения с последующим ответом на вопрос: как можно обосновать отсутствие или необходимость наличия конкретного вида молниезащиты на объекте, а также определить ее влияние на состояние системы пожарной безопасности?

ОТВЕТ:

На сегодняшний день в действующих нормативных документах по пожарной безопасности термин «молниезащита» практически не встречается. Исключением является ст. 50 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности (далее — № 123-ФЗ)¹, где устройство молниезащиты является одним из способов исключения условий образования в горючей среде источников зажигания. Это означает, что технические решения и мероприятия по защите объектов от опасных проявлений молнии входят в систему предотвращения пожара и являются ее неотъемлемой частью согласно гл. 13 № 123-ФЗ (рис. 1).

¹ Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»: принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.: одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

Существующие инструкции по молниезащите^{2,3} не включены в Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований №123-ФЗ⁴, но используются в отдельных «добровольных» ГОСТах из Перечня к Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений (№ 384-ФЗ)⁵. Например, по требованиям ч. 14 СП 423.1325800.2018⁶ для взрывоопасных объектов и п. 9.21 СП 451.1325800.2019⁷ для общественных зданий с деревянными конструкциями молниезащита должна предусматриваться в любом случае. Указанные выше примеры стандартов относятся

² РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений: утверждена Главтехуправлением Минэнерго СССР, введена в действие 12 октября 1987 г.

³ СО 153-34.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: утверждена и введена в действие приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 280.

⁴ Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»: введен в действие 14 июля 2020 г.

⁵ Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»: введен в действие 2 апреля 2020 г.

⁶ Электроустановки низковольтные зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах: (СП 423.1325800.2018): утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2018 г. № 845/пр и введен в действие с 25 июня 2019 г.

⁷ Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования: (СП 451.1325800.2019): утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 22 октября 2019 г. № 643/пр и введен в действие с 23 апреля 2020 г.

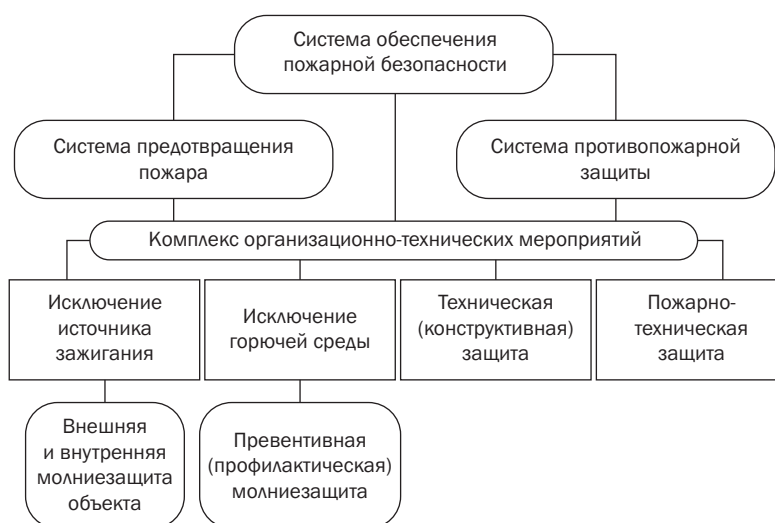


Рис. 1. Место молниезащиты в структуре системы обеспечения пожарной безопасности

к добровольным, а значит, у собственника имеется возможность не выполнять данные требования по молниезащите. В таком случае у него должно быть обоснование отсутствия системы молниезащиты на объекте, которое можно предоставить в виде оценки риска.

Когда речь идет о невыполнении отдельных требований норм пожарной безопасности на объекте защиты, на помощь собственнику приходит расчет рисков, определяющий минимальный перечень технических решений и организационных мер, позволяющих снизить индивидуальный пожарный риск до нормативных значений (ст. 93 № 123-ФЗ). Аналогичным образом можно поступить и при проектировании молниезащиты объекта. Для этих целей существует действующий ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010⁸, который усердно стараются не включать в ссылочную литературу других нормативных документов.

В ст. 50 № 123-ФЗ указывается, что соответствие проектных значений параметров и других проектных характеристик здания, а также проектируемых мероприятий по обеспечению его безопасности при отсутствии к ним требований в нормативной литературе должны быть обоснованы одним или несколькими способами, например:

- моделированием сценариев возникновения *опасных природных процессов и явлений* и(или) техногенных воздействий;
- оценкой риска возникновения *опасных природных процессов и явлений* и(или) техногенных воздействий.

Следовательно, при рассмотрении различных пожаро- и взрывоопасных сценариев и выполнении оценки риска можно учитывать опасность проявления разрядов молний.

Согласно ежегодной статистике пожаров и взрывов от прямых ударов молнии и ее вторичных проявлений, в среднем 500 случаев приводят к гибели порядка 10 человек и экономическому ущербу 100 тыс. руб. [4]. Эти показатели справедливы только для случаев непосредственного воздействия разрядов на человека или здание, которые также могут являться источниками зажигания. В обобщенной статистике для грозовых разрядов нет отдельных сведений о последствиях от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий. Такое положение вещей объясняется сложностью определения источника зажигания, особенно при значительной площади пожара. Удары молнии — явление, которое может быть подтверждено в основном очевидцами при проведении расследования причин пожара. Тем не менее, используя информацию о метеорологической обстановке в зоне ЧС, представляется возможным оценить вероятность появления и пожарную опасность грозовых разрядов.

⁸ ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 2. Оценка риска: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. № 795-ст.

На этапе сбора данных для последующего определения частоты реализации пожароопасных ситуаций на объекте по Методике⁹ предлагается учитывать окружающую гидрометеорологическую обстановку. Полученные данные следует использовать не только для оценки возможного развития пожара по территории или за пределами объекта, но и для получения данных о грозовой активности в рассматриваемом районе.

Среднее количество опасных событий в год N_D в виде прямых ударов молнии в объект можно оценить аналитически по формуле ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010:

$$N_D = N_g A_D C_D \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где N_g — плотность ударов молнии в землю, 1/км в год;

A_D — площадь стягивания ударов молнии в области защиты здания, м;

C_D — коэффициент, характеризующий рельеф местности и окружение объекта другими строениями.

Величина $N_g \approx 0,1 T_D$. По картам грозовой активности в данном регионе или по статистическим данным ближайших метеостанций¹⁰ определяется количество грозовых дней в году T_D .

Площадь стягивания молний A_D получают графическим способом или путем расчетов при известных габаритных размерах здания (сооружения). В общем случае, для любого возвышающегося над поверхностью земли объекта высотой H значение $A_D = 3H$ (рис. 2, а), т.е. для прямоугольного здания длиной L , шириной W и высотой H площадь защиты можно рассчитать по формуле:

$$A_D = LW + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2. \quad (2)$$

Для более сложной формы здания с разной высотой отдельных элементов площадь области защиты определяется путем объединения полученных графическим методом площадей, рассчитанных по формуле (2) (рис. 2, б).

В зависимости от рельефа местности и наличия вокруг здания других более высоких или низких объектов можно определить повышающий или понижающий коэффициент. В случае присутствия вблизи объекта строений большей высоты в уравнение (1) вносится понижающий коэффициент C_D . Список возможных значений коэффициента C_D представлен в табл. А.1 ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010. Как видно, уже на этапе оценки опасных событий N_D стандарт ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 учитывает особенности расположения объекта защиты, чего нет в действующих инструкциях РД 34.21.122-87 и СО 153-34.21.122-2003.

⁹ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утверждена приказом МЧС РФ от 10 мая 2009 г. № 404 (в ред. Приказа МЧС РФ от 14 декабря 2010 г. № 649), введена в действие 4 марта 2011 г.

¹⁰ Онлайн-сводка грозовых очагов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteocenter.asia/ts.php?f=hour> (дата обращения 02.10.2020 г.).

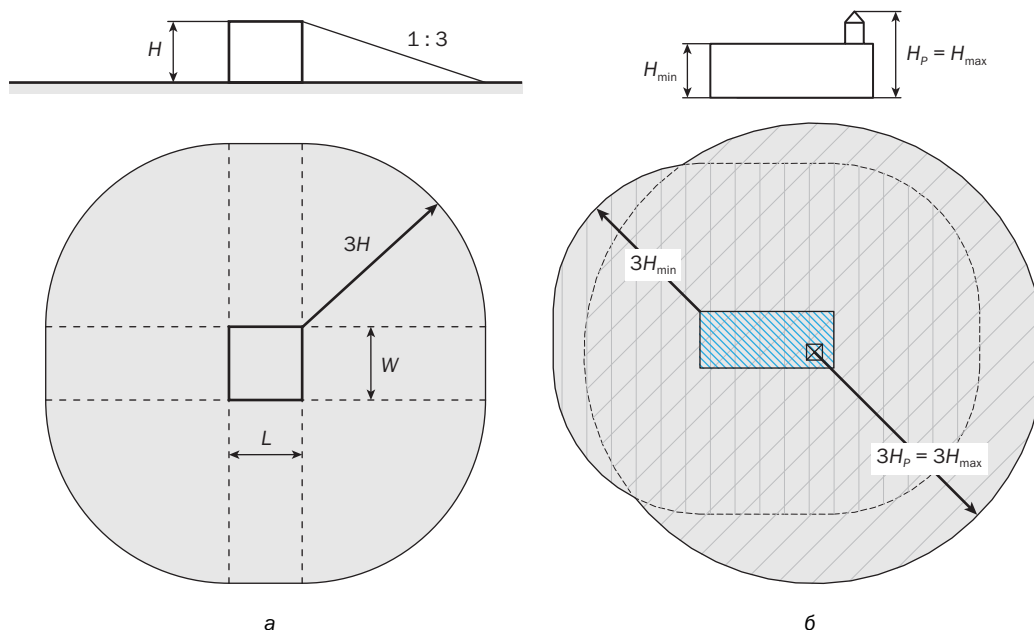


Рис. 2. Площадь области защиты здания (серый цвет): а — для прямоугольного здания высотой H ; б — для здания различной высоты

На основании полученного значения опасных событий N_D в стандарте предусмотрена возможность определить вероятность гибели или травмирования людей R_A от поражения электрическим током на объекте защиты при ударе молнии. Значение R_A определяется по формуле:

$$R_A = N_D P_A L_A, \quad (3)$$

где P_A — вероятность того, что удар молнии в объект защиты может привести к гибели или травме человека;

L_A — косвенные потери, связанные с опасным событием и ведущие к гибели людей (пожар, взрыв, обрушение и т.п. при ударе молнии в объект защиты).

Вероятность P_A учитывает наличие внешних и внутренних систем молниезащиты и защиты от вторичных проявлений молнии. При отсутствии систем молниезащиты вероятность P_A принимается равной 1.

Косвенный ущерб L_A для жизни и здоровья человека учитывает: среднее количество людей, подвергающихся опасности при ударе молнии в здание; вид грунта (пола); количество и длительность присутствия людей на объекте и вблизи его опасной зоны (площадь стягивания).

По ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 полученное значение R_A не должно превышать предельно допустимого $R_T = 10^{-5}$ в год (приемлемый риск). Значения приемлемого риска по стандарту носят рекомендательный характер и могут быть изменены с учетом особенностей функционирования различных объектов и их пожаровзрывоопасности.

Помимо оценки вероятности R_A , методика, изложенная в стандарте, позволяет оценить вероятность R_B возникновения пожара или взрыва от удара молнии в объект защиты. Ее оценка представляет наибольший интерес с позиции обеспечения пожарной безопасности объекта. На значение R_B влияют габаритные размеры здания,

наличие в нем горючих веществ и материалов, систем молниезащиты и противопожарной защиты. Вероятность R_B определяется аналогично формуле (3) с учетом данных, полученных из формулы (1):

$$R_B = N_D P_B L_B, \quad (4)$$

где P_B — вероятность того, что удар молнии в объект защиты может привести к повреждению здания;

L_B — косвенные потери, связанные с опасным событием и ведущие к повреждению здания (пожар, взрыв, обрушение и т.п. при ударе молнии в объект защиты).

Вероятность P_B выбирается по табл. В.2 ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 и зависит от вида применяемой молниезащиты, материалов кровли и стен объекта защиты. При отсутствии молниезащиты вероятность P_B равна 1.

Потери L_B включают в себя те же компоненты, что и L_A , а также два важных коэффициента снижения потерь: r_p — за счет использования противопожарного оборудования; r_f — в зависимости от опасности возникновения пожара в здании (наличие взрывоопасных зон или количества пожарной нагрузки) и повышающий коэффициент h_z , определяющий уровень паники (функциональная пожарная опасность здания и количество человек в нем).

Обе вероятности R_A и R_B являются компонентами одного из видов риска R_1 — риска гибели и травмирования людей.

Конечно, это не все компоненты оценки риска R_1 , представленные в стандарте, но возможность его применения в целях обеспечения пожарной безопасности объекта и защиты людей является вполне реальной и в некотором смысле необходимой мерой.

Представленные выше данные по оценке риска требуют на сегодняшний день дальнейшего уточнения. Особенно это касается повышающих и понижающих коэффициентов, которые приняты в стандарте ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010, в общем смысле, из воздуха. По факту, они должны выбираться на основании статистических или иных обоснованных данных с учетом степени влияния на значение конечной величины риска отдельных его составляющих [5, 6]. Некоторые из представленных в ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 параметров получены с помощью математической статистики [7], позволяющей количественно оценить опасность разрядов молнии для объекта защиты. В то же время такая оценка указывает на неоднозначность определения отдельных составляющих риска [8].

Основной целью большинства специалистов, применяющих данную методику, является введение конкретных требований по видам, составу и структуре систем молниезащиты в зависимости от полученных значений риска. Другими словами, следует найти путь для перехода от расчетов к практике. Для этого ведется активная работа по систематизации имеющейся информации в виде экспресс-таблиц [9], которые должны появиться в новых редакциях стандарта ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010. Они должны помочь проектировщикам выбрать конкретные технические решения и мероприятия по защите объекта, обеспечивающие приемлемый риск.

Следует отметить, что методика оценки риска поражения человека и здания прямым ударом молнии и ее вторичными воздействиями применяется в Республике Беларусь в виде ТКП 336-2011¹¹ и является обязательной составляющей при проектировании, реконструкции, ремонте зданий и сооружений различного назначения.

Таким образом, существующая методика оценки риска удара молнии и ее вторичных воздействий в ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 может успешно применяться специалистами в проектной практике для определения наиболее вероятных событий, ведущих к возникновению пожара (взрыва) и возможной гибели людей и выбору обоснованной системы молниезащиты объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 89–91. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/810>

¹¹ Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций : (ТКП 336-2011 (02230)) : введена в действие 12 августа 2011 г. Минск (Респ. Беларусь): Минэнерго, 2011.

2. Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 89–92. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/826>

3. Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 3 // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29, № 2. С. 63–67. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/848>

4. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.

5. Farkas T.D., Szedenik N., Kiss I. Sensitivity analysis in lightning protection risk management: Journal of Electrostatics, 2013. Vol. 71. Pp. 582–585. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.12.040

6. Kasza Z., Kovacs K. Risk analysis about lightning protection for buildings focusing on risk of loss of human life // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. Pp. 458–465. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.240

7. Gellén T.B., Szedenik N., Kiss I., Németh B. On the problems regarding the risk calculation used in IEC 62305 // Journal of Physics: Conference Series, Volume 301, 13th International Conference on Electrostatics 10–14 April 2011, Bangor, Wales, UK. 2011. 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/301/1/012065

8. Bouqueneau C. A critical view on lightning protection international standard: Engineering // Journal of Electrostatics. 2007. Vol. 65. Pp. 395–399. DOI: 10.1016/j.elstat.2006.09.009

9. Szedenik N., Bodócs T., Kiss I., Berta I. Developed simplification of the risk assessment // The 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE. 2016. 4 p. DOI: 10.1109/ICLP.2016.7791378

Материал поступил в редакцию 15.10.2020
Received October 15, 2020

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ПИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Senior Lecturer of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, State Fire Academy of Emercom of Russia; Moscow, 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 неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предположениями, 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. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!



ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Научно-
исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ железобетонных конструкций
- ♦ противопожарных преград
- ♦ легкобрасываемых конструкций
- ♦ фасадных систем
- ♦ палуб, переборок

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

Свидетельство о признании испытательной лаборатории
Атестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АИ09 от 24.06.2014 г.
РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.