6-2020

FIRE and EXPLOSION SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ N-P-СОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ

№6 ТОМ 29 2020

Издательство ПОЖНАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

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

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

Выход в свет 30.12.2020.

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: pexels.com; drive2.ru; restate.ru; rospol-electro.ru; depositphotos.com

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунабби, Великобритания)
Стрижак П.А., д. ф.-м. н., профессор (Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия)

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

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

В.В. БОГДАНОВА, О.И. КОБЕЦ
Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор) **5**

А.Н. ГАРАЩЕНКО, А.В. ВИНОГРАДОВ, И.З. ДАШТИЕВ, Н.В. КОБЫЛКОВ, С.А. ТЕРЕХОВ
Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева **28**

Т.Ю. ЕРЕМИНА, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Ф.А. ПОРТНОВ
Использование диаграмм совместимости для оптимизации исследования огнезащитных материалов **40**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А.И. НЕДОБИТКОВ
О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В **50**

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

И.В. САМАРИН , А.В. КРЮЧКОВ, А.Ю. СТРОГОНОВ
Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов **61**

В.Н. ФИЛИППОВ, Г.И. ПЕТРОВ, Ю.Н. ШЕБЕКО, С.В. БЕСПАЛЬКО, И.К. СЕРГЕЕВ
Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов (обзор) **75**

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

Е.А. ОВСЯННИКОВ, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, В.Л. СЕМИКОВ
Тушение возгораний кабелей комплектных трансформаторных подстанций **84**

ВОПРОС – ОТВЕТ

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Электропроводка в пожароопасных зонах **91**

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2020 г. **95**

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2020 г. **98**

CONTENTS

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

V.V. BOGDANOVA, O.I. KOBETS
Development and application of synthetic NP dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires (Review) **5**

A.N. GARASHCHENKO, A.V. VINOGRADOV, I.Z. DASHTIEV, N.V. KOBYLKOV, S.A. TEREKHOV
Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material **28**

T.Yu. EREMINA, D.A. KOROLCHENKO, F.A. PORTNOV
Using compatibility charts to optimize research into fire retardants **40**

ELECTRICAL ENGINEERING

A.I. NEDOBITKOV
On specific short circuit parameters of 12 V automobile electric systems **50**

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

I.V. SAMARIN , A.V. KRYUCHKOV, A.Yu. STROGONOV
Thermochemical gas analyzer readiness assessment model **61**

V.N. FILIPPOV, G.I. PETROV, Yu.N. SHEBEKO, S.V. BESPALCO, I.K. SERGEEV
Methods of improving the fire and explosion safety of operation of liquefied hydrocarbon gas transportation tanks (Review) **75**

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

E.A. OVSYANNIKOV, D.A. KOROLCHENKO, V.L. SEMIKOV
Extinguishment of cable fires at packaged transformer substations **84**

QUESTION – ANSWER

A.S. KHARLAMENKOV
Electrical wiring in fire hazardous areas **91**

AUTHORS INDEX '2020 **95**

GUIDE INDEX OF THE ARTICLES PUBLISHED IN 2020 **98**

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

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

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2020

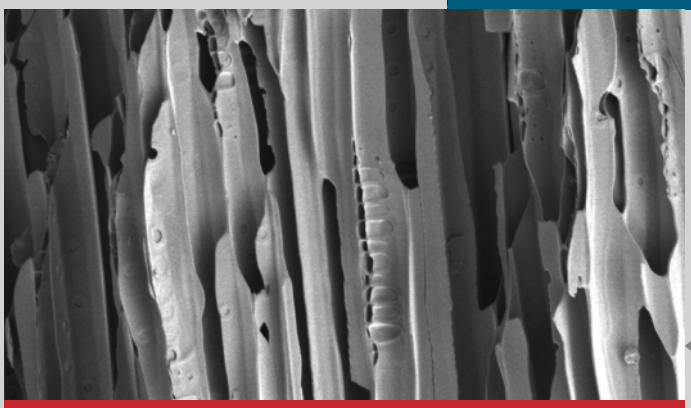
© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2020

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

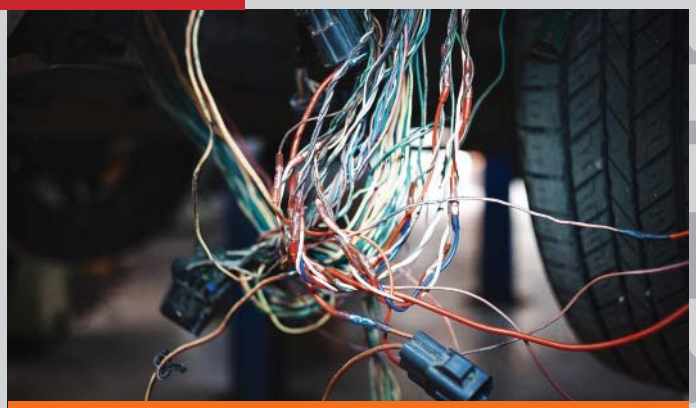
Применение синтетических дисперсий при лесных пожарах

Стр. 5



Стр. 40

Оптимизация в исследованиях огнезащитных материалов



Короткое замыкание в автомобильной электрической сети

Стр. 50

Стр. 75

Пути повышения пожаровзрывобезопасности цистерн

Стр. 84

Тушение возгораний трансформаторных подстанций

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

FIRE AND EXPLOSION SAFETY

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

No.6 VOL. 29 2020

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

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

Date of publication 30.12.2020.

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

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

EDITORIAL BOARD:
I.K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, Republic of Bashkortostan)
N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russia)
A.A. Berlin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences (Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)
N.N. Brushlinskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
A.I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
P. Wagner, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)
S.V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
V.N. Lozhkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russia)
I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)
Yu.Kh. Polandov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)
S.V. Puzach, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of National Academy of Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
K.Zh. Raimbekov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (Kokshetau Technical Institute, Committee of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan)
A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management, Budapest, Hungary)
R.L. Roe, Professor (Georgetown University Law Center, Washington, United States)
B.B. Serkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
A.G. Tamrazyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of Russian Academy of Engineering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)
N.G. Topolskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of National Academy of Fire Science, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
V.V. Kholshchevnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)
B. Hristov, Dr. Ing., Professor (University of Applied Sciences, Berlin, Germany)
A. Celani (Polytechnic University of Milan, Milan, Italy)
R.M. Ciric, Ph. D., Professor (The Higher Technical School of Professional Studies, Novi Sad, Serbia)
Yu.N. Shebeko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russia)
T.J. Shields, Ph. D., Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)
R.C. Shouse, Ph. D. (Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United States)
S.E. Yakush, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.5-27
УДК 614.841,630.432

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ / RREVIEW PAPER

Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор)

© **В.В. Богданова** ✉, **О.И. Кобец**

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Ленинградская, 14)

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен анализ огнезащитных и огнетушащих средств, применяемых для предупреждения и тушения пожаров в природном комплексе. Показано, что в настоящее время отсутствуют атмосферостойкие, экологичные и экономичные средства, способные одновременно прекращать горение древесины и торфа.
Цель и задачи. Разработка экономичного и экологичного синтетического средства, обладающего одновременно огнезащитным и огнетушащим действиями по отношению к природным горючим материалам.
Материалы и методы. Объектом исследования являлись синтетические дисперсии аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов и огнезащищенные ими древесина и торф. Исследованы физико-химические свойства продуктов синтеза в сопоставлении с их огнезадерживающей эффективностью. Огнезащитные, огнетушащие и физико-химические свойства синтезированных продуктов определяли с использованием регламентированных ГОСТами методов термического и химического анализа, сканирующей электронной микроскопии и собственных оригинальных методик.
Результаты и их обсуждение. С применением полного факторного эксперимента оптимизирована рецептура синтетического средства «Комплексил», эффективного при тушении и огнезащите древесины и торфа. Одновременно установлен общий для природных горючих материалов доминирующий процесс ингибирования горения — поступление летучих азотсодержащих продуктов в газовую фазу. Определены атмосферостойкие (сохранение огнезащитных свойств на лесных горючих материалах при выпадении 79 мм осадков) и лесоводственно-экологические (улучшение условий минерального питания и роста лесных фитоценозов) свойства состава «Комплексил».
Выводы. Разработан синтетический экономичный состав на основе природного минерального сырья, проявляющий огнезащитную и огнетушащую эффективность при защите лесных горючих материалов и торфа. Проведены испытания разработанного средства при тушении реальных природных пожаров, определена его атмосферостойкость и установлена положительная реакция лесных фитоценозов на применение состава комплексного действия. Использование «Комплексила» позволяет снизить временные затраты и расход огнетушащего средства при тушении природных пожаров, что значительно уменьшает материальный ущерб.

Ключевые слова: огнезащита; огнетушение; ингибирование горения; фосфаты; дисперсии

Для цитирования: *Богданова В.В., Кобец О.И.* Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 5–27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27

✉ *Богданова Валентина Владимировна*, e-mail: bogdanova@bsu.by

Development and application of synthetic NP dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires (Review)

© **Valentina V. Bogdanova** ✉, **Olga I. Kobets**

Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (Leningradskaya St., 14, Minsk, 220006, Republic of Belarus)

ABSTRACT

Introduction. The analysis of flame retardants and extinguishing agents used for preventing and extinguishing fires in an ecosystem is carried out. It is shown that at present there are no weatherproof, environmentally friendly and cost effective extinguishing agents capable of stopping wood and peat burning.
Purpose and objectives. Development of cost effective and environmentally friendly synthetic agents capable of both flame retarding and extinguishing natural combustible materials.
Materials and methods. Synthetic dispersions of ammonium phosphates of two- and three-valence metals, as well as wood and peat fireproofed by them are the object of the study. Physical and chemical properties of synthesis products in comparison with their fire retarding efficiency are examined. Fireproofing, fire extinguishing, as

well as physical and chemical properties of synthesized products are determined using GOST-regulated methods of thermal and chemical analysis, scanning electron microscopy and original methods.
Results and discussion. The formulation of Kompleksil synthetic compound effective in extinguishing and fireproofing wood and peat is optimized using a full factorial experiment. At the same time, the inflow of volatile nitrogen containing products into the gaseous phase is identified as the dominating burning inhibition process common for natural combustible materials. The weather resistance (preservation of fireproof properties in respect of forest combustible materials at 79 mm precipitation), forest and environment enhancement (improvement of mineral nutrition conditions and growth of forest plant communities) properties of Kompleksil compound are identified.
Conclusions. A cost effective synthetic compound based on natural mineral materials showing fireproofing and extinguishing efficiency when protecting forest combustible materials and peat is developed. This compound was tested in the process of extinguishing real wildfires; its weather resistance is identified, and the positive response of forest plant communities to the application of this multiple action compound is registered. The use of Kompleksil allows to reduce time expenditures and fire extinguishing agent consumption when extinguishing wildfires, which significantly reduces material damage.

Keywords: fireproofing; fire extinguishing; burning inhibition; phosphates; dispersions

For citation: Bogdanova V.V., Kobets O.I. Development and application of synthetic NP dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):5-27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27 (rus).

✉ *Valentina Vladimirovna Bogdanova*, e-mail: bogdanova@bsu.by

Введение

Борьба как с природными пожарами, так и с горючестью деревянных строительных конструкций остается актуальной вследствие социальных, экологических и экономических проблем [1–5]. Горение твердых горючих материалов (ТГМ), к которым относятся древесина и торф, — сложный физико-химический процесс, сопровождающийся протеканием последовательно-параллельных превращений в конденсированной и газовой фазах. Одновременно эти природные полимеры склонны к беспламенному горению — тлению и, как следствие, к повторному воспламенению [6–9], что является причиной распространения природных пожаров на большие расстояния. Так как природные горючие материалы (древесина и торф) представляют собой системы, характеризующиеся надмолекулярной структурой, влагосодержанием, отклонением химического состава от среднестатистического, наличием примесей, до сих пор не установлены факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение их горения [10, 11]. Это затрудняет направленное создание замедлителей горения для конкретного ТГМ.

Трудность предотвращения и тушения лесных и подземных пожаров обусловлена существенным различием химического состава и физико-химических свойств этих ТГМ. Основными компонентами лесных горючих материалов (ЛГМ) являются целлюлоза (50…55 %) и лигнин (25 %), другими составляющими древесины (17…26 %) являются смолы и эфирные масла [8, 11, 12]. Органические вещества торфа состоят из битумов (до 17 %), гуминовых и фульвовых кислот (24,7…40 % и 15,5…16,6 %, соответственно), целлюлозы (2,4…7,3 %) и негидролизуемого остатка (7,4…12,3 %) [13, 14]. Различие в химическом составе ЛГМ и торфа ощутимо сказывается на их физико-химических и термических свойствах [15–17].

Процессу горения ТГМ предшествует целый ряд стадий, начиная с подсушки горючего материала и заканчивая превращением их в газообразное состояние. В работах [18, 19] выделено несколько стадий разложения древесины. При температуре от 110 до 115 °С происходит интенсивное испарение капиллярной и адсорбированной воды. При 150…200 °С выделяется углекислый газ, а при температуре более 200 °С начинают разлагаться целлюлоза и лигнин, этот процесс достигает максимума при температурах 275…300 °С. При температурах 400…430 °С процесс разложения древесины и выделение горючих газов завершается, древесина обугливается, и при 500 °С на ее поверхности протекает горение угля.

Термолиз торфа, так же как и древесины, происходит ступенчато, согласно поочередному разложению составляющих его компонентов. В отличие от древесины торф менее термостоек — его деструкция начинается уже при 100…160 °С с деструкции водорастворимых и легкогидролизуемых компонентов [20, 21]. При температурах 200…350 °С происходит пиролиз периферической части молекул гуминовых кислот, а выше 350 °С пиролизуется их центральная часть [22]. Согласно ЯМР-исследованию [23], с повышением температуры до 500 °С начинается разрушение ароматических структур вещества торфа. Отсюда следует, что при разработке огнезащитных и огнетушащих средств (ОС) для древесины и торфа необходимо учитывать различия температурных интервалов их термического разложения и физико-химических свойств этих природных горючих материалов.

Потухание ТГМ обусловлено резким уменьшением скорости химических реакций в результате изменения условий тепло- и массопереноса между пламенной зоной и пиролизующимися в конденсированной фазе материалами [24]. Так, прекращение горения возможно в результате применения следующих способов [25–29]: использования жидких и газообразных охлаждающих агентов; создания на поверхности исходного или горящего материала термоизолирующего покрытия или расплава; применения веществ, изменяющих условия термического разложения целлюлозосодержащих природных горючих материалов преимущественно до карбонизованного остатка и воды, а также реагентов, способных к испарению и разложению при нагревании с образованием продуктов, разбавляющих пламенную зону инертными газами и связывающими активные частицы, ответственные за развитие процесса горения.

Наиболее распространенным способом тушения природных пожаров является применение чистой воды и воды с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ), смачивателей и/или пленкообразующих полимерных агентов [30–33]. Известно [34, 35], что эффективность применения воды возрастает при ее подаче на очаг в тонкораспыленном виде за счет более высокого охлаждающего эффекта мелких капель жидкости. Такой способ тушения не эффективен для древесных горючих материалов, а тем более для торфа вследствие кратковременности действия, низкой способности подавления тления и смачиваемости подсушенного торфа и древесины в зоне, прилегающей к очагу горения, а также из-за невозможности обеспечения требуемого расхода и интенсивности подачи воды на очаг горения. Использование порошковых огнетушащих средств также неэффективно по причине их высокого расхода (5…6 кг/м^2) при отсутствии гарантии прекращения горения и тления ТГМ [3, 36].

Для снижения расхода воды и увеличения ее эффективности предлагается использовать различные минеральные добавки ($Al(OH)_3$, бентонит, бишофит, шунгит [$Mg_3Ca\ (CO_3)_4$], гидромагнезит [$Mg_5\ (CO_3)_4\ (OH)_2 \cdot 4H_2O$]) [37, 38]. Авторами [4] для снижения горючести древесины предложено использовать комплексный подход: обработку древесины пропиточными антипиреновыми составами, а затем дисперсионными средствами изолирующего действия. При этом установлено снижение времени ликвидации пламенного горения, тогда как данные о расходах этих дисперсий на огнезащиту и тушение древесины отсутствуют.

Авторами [39–41] предложено применять быстротвердеющую кремнийсодержащую пену как для тушения лесных горючих материалов, так и для прокладки противопожарных заградительных полос. Недостатками этих огнезащитно-огнетушащих средств являются высокая стоимость и сложная технология их получения — смешивание агентов, находящихся в различных емкостях, непосредственно перед применением. Все перечисленное относится и к пенам, получаемым на основе карбамидно-формальдегидной смолы при добавлении серной кислоты [42]. Быстротвердеющие пены не пригодны для локализации и тушения торфяных пожаров, которые протекают под землей.

В работах [43, 44] предприняты попытки повысить эффективность тушения лесных горючих материалов водой путем увеличения ее вязкости и изолирующей способности путем добавления веществ охлаждающего и/или загущающего действия. Исходя из полученных данных, эффективность тушения водой при повышении ее вязкости, добавлении гидроксида алюминия, бишофита или бентонита увеличивалась, однако наблюдения за отсутствием или наличием тления после тушения не проводились. Изолирующие покрытия вспучивающегося типа [45–47] для огнезащиты и тушения лесных горючих материалов не применялись.

Кроме применения воды, одним из наиболее распространенных способов огнезащиты и тушения лесных горючих материалов является применение растворов неорганических, органических азот-фосфорсодержащих соединений или их смесей [48–55], однако тушение торфа с применением химических огнетушащих средств до наших работ не проводилось. Из-за конечных свойств соединений, входящих в известные огнезащитно-огнетушащие составы, проблематично создать средство, адресно воздействующее на доминирующие процессы, вносящие основной вклад в изменение условий тепло- и массообмена между пламенной зоной и подвергающимися пиролизу в конденсированной фазе твердыми горючими материалами. В свою очередь, отсутствие объектов с регулируемыми физико-химическими параметрами, обладающих ингибирующими горение свойствами по отношению к разным по химической природе материалам — древесине и торфу, сдерживает получение информации об общности или различии подходов к прекращению их горения и о факторах, оказывающих определяющее влияние на эффективность огнезащиты и тушения природных горючих материалов, склонных к тлению и повторному воспламенению.

В зависимости от физического состояния и химического состава горючего вещества механизм прекращения горения может быть разным [56–59]. Ингибирование горения ТГМ может осуществляться физическими и химическими методами за счет изменения как условий тепло- и массопереноса, так

и скорости и направления химических реакций. Из литературных данных применительно к природным горючим материалам до настоящего времени преобладающей точкой зрения относительно механизма действия замедлителей горения на потухание ТГМ является ускорение образования угольного остатка, обладающего термоизолирующим действием [32, 56–60]. В работах [60–64] наряду с катализом образования карбонизованных продуктов термолиза древесины ингибиторами горения отмечается дополнительная роль продуктов взаимодействия компонентов антипиреновой системы, которые при горении древесины формируют на ее поверхности термостабильные структуры. Согласно [65], прекращение горения целлюлозосодержащих материалов обусловлено ингибированием радикальных процессов в газовой фазе. По мнению авторов [66–68], наряду с процессами каталитической дегидратации древесины преимущественно до карбонизованного остатка в присутствии замедлителей горения происходит ингибирование радикальных реакций в пламенной зоне.

В соответствии с разнообразными точками зрения на механизм ингибирования горения древесины и лесных горючих материалов, обусловленных в основном результатами термических и калориметрических исследований древесины, огнезащищенной составами различной эффективности, до настоящего времени не выявлена доминирующая стадия прекращения их горения, что не позволяет осуществлять направленный подход к созданию огнетушащих и огнезащитных средств для природных горючих материалов.

При рассмотрении торфа как горючей системы необходимо знать, что он собой представляет с физико-химической точки зрения. В литературе по торфохимии [69] торф отнесен к классу сложных многокомпонентных полидисперсных систем. Сложность состава торфа связана с наличием в его объеме органической, минеральной и водной компонент. К важнейшим показателям физико-химических свойств торфа кроме его химического состава относятся его дисперсность, пористость, влажность и влагоемкость [69–71]. Для тушения торфяных пожаров последние два параметра наиболее важны, так как основным способом прекращения торфяного пожара до настоящего времени является создание влажности, при которой горение торфа прекращается — 69…72 % [70–72]. Тушение торфа, который существенно отличается от древесины по химическому составу, физико-химическим свойствам, температурам начала горения и скорости разложения [14, 16, 26, 71–75], до настоящего времени осуществляется водой или водой с добавлением ПАВ [76–78].

Таким образом, направленное создание и регулирование физико-химических и, соответственно, огнезащитно-огнетушащих свойств замедлителей горения проблематично без получения информации о процессах, протекающих при горении и термическом разложении огнезащищенных составами различной эффективности горючих материалов как в конденсированной, так и в газовой фазах и их вкладе в прекращение горения природных горючих материалов. Особенность горения природных горючих материалов, состоящих в основном из органического вещества, заключается в их высокой склонности не только к горению, но и тлению, протекающему с выделением тепла в поверхностном слое конденсированной фазы. Тление — беспламенное горение — является причиной скрытого горения древесины и торфа, которое может перейти в режим пламенного горения. В соответствии с этим тушение лесных горючих материалов включает в себя стадию прекращения пламенного горения и стадию потухания тлеющих остатков, что необходимо учитывать при разработке средств тушения и огнезащиты.

Одновременно назрела необходимость создания ингибитора горения комплексного действия, эффективного при огнезащите и тушении разных по химической природе материалов — древесины и торфа. Немаловажное значение для масштабного применения средств огнезащиты и пожаротушения имеют атмосферостойкость, экономичность и экологичность этих средств, что усложняет выбор реагентов для синтеза и разработку технологии их получения и применения.

Ранее нами показана [50, 79] перспективность применения в качестве огнезащитных и огнетушащих средств для синтетических и природных полимеров фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, образующих устойчивые дисперсии аморфных малорастворимых двойных фосфатов и имеющих широкий диапазон свойств. Это позволяет получать продукты, направленно воздействующие на процессы, протекающие при термическом разложении и горении ТГМ как в конденсированной, так и в пламенной зонах.

С целью разработки путей направленного создания огнезащитно-огнетушащих синтетических эффективных и экономичных замедлителей горения природных горючих материалов необходимо выявить факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения древесины и торфа, что позволит регулировать химический состав и физико-химические свойства продуктов синтеза для адресного воздействия на процессы, ответственные за пламенное горение и тление. Выявление таких факторов возможно при проведении сопостави-

тельных исследований огнезащитно-огнетушащих свойств синтетических замедлителей горения с их физико-химическими свойствами, регулируемыми на стадии получения в результате изменения природы исходных реагентов и условий проведения синтеза.

Материалы и методы

Основными элементами, соединения которых проявляют антипирирующие свойства и экологически безвредны, являются азот, фосфор, бор, кремний, цинк, кальций и магний [80–83]. Исходя из данных о температурах, реализующихся в предпламенной зоне конденсированной фазы на различном удалении от поверхности горения (200…500 °С) древесины и торфа [11, 84–86], в данной работе для снижения затрат на локализацию и тушение как лесных, так и торфяных пожаров в качестве исходных реагентов для синтеза замедлителей горения, способных в этом температурном интервале образовывать изолирующие расплавы, вспененные структуры и летучие азот-фосфорсодержащие продукты, использовали недефицитное минеральное сырье следующего химического состава в пересчете на оксиды, % мас.: доломит — 30,0 CaO, 20,5 MgO, 1,7 SiO_2, 0,4 Al_2O_3, 0,4 Fe_2O_3; бентонит — 35,0 SiO_2, 11,0 Al_2O_3, 27,3 CaO, 2,5 Fe_2O_3, 0,1 TiO_2; трепел — 70,0 SiO_2, 11,5 Al_2O_3, 1,3 CaO, 0,7 MgO, 1,5 Fe_2O_3; брусит — 69,0 MgO. Выбор перечисленных природных реагентов обусловлен их химическим составом, так как на предыдущих этапах исследования [87, 88] с использованием чистых химических реагентов синтезированы металл-, кремний-, азот-фосфорсодержащие продукты с удовлетворительными огнетушащими и огнезащитными свойствами по отношению к древесине (ОС-1) или торфу (ОС-2). Эти составы использованы нами в качестве составов сравнения при определении огнезадерживающих свойств продуктов, получаемых на основе минерального сырья с целью создания средства, эффективного одновременно при огнезащите и тушении древесины и торфа.

Определить факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения ТГМ, предполагалось путем варьирования состава реакционной смеси (природных минералов, модифицирующих и нейтрализующих агентов), а также условий проведения синтеза на основе сопоставительных исследований зависимости огнезащитной и огнетушащей эффективности получаемых продуктов от их физико-химических свойств. Получение такой информации необходимо для направленного регулирования свойств известных и создания новых эффективных и экономичных средств предупреждения и тушения природных пожаров. Одновременно при разработке рецептур ОС для различных по своей природе горючих материалов учитывалось различие их физико-химических и термических свойств: температура интенсивного разложения торфа составляет 180…300 °С, а древесины — 300…350 °С [6, 11].

С использованием золь-гель методики [88, 89] получены продукты с использованием доломита, брусита, бентонита или трепела, которые представляли собой устойчивые водные дисперсии фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония [90–93]. Для исследования выбран торф низинного типа с высокой степенью разложения (20…45 %). При оценке огнетушащей способности ОС по отношению к торфу с учетом его специфических свойств определяли зольность [93], потерю массы при горении и смачивающую способность ОС торфа различной влажности.

Огнезащитную эффективность этих же замедлителей горения для древесины устанавливали по ГОСТ 16363–98[1] с дополнительной фиксацией температуры отходящих газов, а эффективность тушения оценивали по лабораторной методике [94], учитывающей пожарную нагрузку и коэффициент поверхности горения нормативных очагов пожара класса А.

Атмосферостойкость (способность огнезащищенных образцов древесины после водных обработок сохранять устойчивость к воздействию огня) определяли по лабораторной методике [95], моделирующей выпадение осадков в объеме 34…40 мм, а также путем проведения испытаний огнезащитных полос в реальных условиях. Температурный профиль, реализующийся на поверхности и в приповерхностном слое (на глубине 5 см) исходного и огнезащищенного торфа при горении, выявляли по методике [96], где наблюдения проводили до полного остывания образцов. Изолирующую способность сравнивали по высоте образующегося вспененного каркаса при нагревании сухих ОС до 300…350 °С в течение фиксированного времени (40 мин). Температурный интервал выбран в соответствии с данными о температурах, реализующихся в предпламенной зоне конденсированной фазы на первой стадии термического разложения природных горючих материалов. Температуру начала плавления этих же ОС устанавливали, наблю-

[1] ГОСТ 16363–98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 13 от 28 мая 1998 г.); Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 25 сентября 1998 г. № 357 межгосударственный стандарт ГОСТ 16363-98 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 июля 1999 г.

дая за агрегатным состоянием сухих продуктов в изотермических условиях прогрева в интервале 150…200 °С в течение 10 мин. За температуру начала плавления ОС принимали температуру, выше которой в данных условиях наблюдалось образование расплава.

Растекаемость расплавов исследуемых продуктов синтеза как характеристику их вязкости и экранирующей способности находили по показателю растекаемости по ГОСТ Р 50045–92[2] [97] при нагревании составов сравнения и образцов ОС из минерального сырья (в виде таблеток массой по 1,0 ±0,01 г) в интервале температур 350…400 °С. Показатель растекаемости расплава по площади F_s вычисляли по формуле $F_s = S_n/S_l$, где S_n — площадь растекаемости расплава испытуемого состава, мм^2; S_l — площадь растекаемости расплава сравнения (мм^2). Теплопоглощающую способность выражали коэффициентом $K_T = V_0/V_{ОС}$, где V_0 — скорость остывания металлической пластины, нагретой до 360 °С; $V_{ОС}$ — скорость остывания этой же пластины с нанесенным на ее поверхность ОС.

Рентгенофазовый состав исходных ОС и продуктов их прогрева проводили на дифрактометре ДРОН-2 (Cu K_α излучения). Микроструктуру поверхности исходной и огнезащищенной древесины до и после водных обработок исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 (Carl-Zeiss SMT AG, Германия). Данные получены при анализе реплик, снятых с внутренней поверхности сколов, сделанных вдоль волокон древесины на расстоянии 5 мм от поверхности образца. Дисперсность частиц нерастворимой части ОС исследовали с помощью автоматизированной системы АСТА-5, включающей в себя оптический микроскоп, телекамеру с выводом на монитор компьютера, который осуществляет статистическую обработку увеличенного изображения дисперсного материала. Размер коллоидных частиц в жидкой части суспензий устанавливали с помощью просвечивающего электронного микроскопа LEO 906 E (Carl-Zeiss SMT AG, Германия).

Образцы препарировали прямым методом на коллодиевой пленке-подложке. Калориметрические данные (ДСК, ТГ) для синтезированных продуктов и огнезащищенных ими образцов древесины и торфа сняты в интервале 20…600 °С (скорость подъема температуры 10 К/мин в атмосфере кислород/азот) на установке Netzsch STA 449 C. Теплопоглощающие свойства исследуемых образцов определяли как суммарную теплоту Q, Дж/г, поглощенную в процессе физико-химических превращений в интервале температур 20…500 °С. Расчет проводили с применением программного приложения по площади комплексных пиков эндотермических эффектов при обработке кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Суммарное поступление азот- и фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу в пересчете на азот и фосфор ($\Sigma\Delta N$ и $\Sigma\Delta P$) определяли по разнице содержания азота и фосфора в граммах в пересчете на 100 г в исходных и огнезащищенных образцах древесины и торфа, прогретых в интервале температур 200…500 °С в течение 10 мин. Температурный интервал соответствует температурам, реализующимся в конденсированной фазе на различном расстоянии от поверхности горения ТГМ, а временной интервал соответствует выходу в исследуемом температурном интервале кривых потери массы на плато, что необходимо для сопоставления полученных данных для ОС с различной эффективностью. Количество азота и фосфора в твердых продуктах термообработки огнезащищенных опилок и торфа определяли микрохромовым методом Тюрина [98] и спектрофотометрическим методом [99] соответственно.

Результаты и их обсуждение

Одной из особенностей торфяного материала является его низкая смачиваемость в результате подсушивания в зоне, прилегающей к фронту горения. Это приводит к нерациональному использованию воды, которая при тушении торфяного пожара уходит в дренаж. Для получения информации о влажности торфа, находящегося на различном удалении от фронта пламени в реальном очаге пожара, нами проведено определение влажности проб, взятых на различных расстояниях и глубине от кромки горения (табл. 1).

Таблица 1. Изменение влажности торфа в зависимости от расстояния и глубины отбора проб по отношению к фронту пламени

Table 1. Change in peat moisture content based on the distance and sampling depth in relation to the flame front

Расстояние от кромки пожара, м Distance from the fire edge, m	Относительная влажность, %, на глубине отбора проб, см Relative humidity, %, at the sampling depth, cm			
	0…5	10…20	40…50	60…70
Кромка / Edge	12,7	30,4	40,3	49,7
0,5	20,8	40,2	45,2	51,4
1,5	24,2	43,2	41,6	51,0
5,0	25,1	42,7	47,2	51,7

[2] ГОСТ Р 50045–92 (ИСО 4534–80). Эмали стекловидные. Определение характеристик текучести. Испытание на растекаемость : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23 июля 1992 г. № 761.

Найдено, что в возникшем очаге горения торф интенсивно подвергается поверхностной подсушке на достаточно большом расстоянии и глубине от кромки пламени. Экспериментами при поджигании торфа различной влажности установлено, что сухой торф после прекращения воздействия огня тлеет 40 мин, а торф влажности 17…18 % — 20 мин. Торф с 20 % влажностью способен впитать около 5 % воды, содержащей 0,3 % анионактивного ПАВ, тогда как при аналогичных испытаниях торф впитывает более 10 % ОС. Одновременно найдено, что применение ОС, в отличие от воды и воды с ПАВ, позволяет ликвидировать тление торфа. Этими экспериментами показано преимущество применения ОС по сравнению с водой и водой с ПАВ, заключающееся не только в существенно более низких расходах на тушение ТГМ, но и в ликвидации тления и предотвращении повторного возникновения пламенного горения.

Проведен синтез, исследованы термические и физико-химические свойства различных вариантов ОС с использованием природного минерального сырья [87, 90–93, 100, 101], представляющих собой суспензии, состоящие из твердой дисперсной фазы, распределенной в растворимой компоненте. Рентгенофазовым исследованием установлено, что дисперсная часть синтезированных продуктов рентгеноаморфна, а в растворимой части ОС обнаружен дигидрофосфат аммония ($NH_4H_2PO_4$) и в зависимости от природы используемых реагентов присутствуют фосфаты, сульфаты, хлориды аммония и/или калия. Следов исходных минеральных агентов в продуктах синтеза не обнаружено. Для всех синтезированных продуктов установлены огнезащитная и огнетушащая эффективность по отношению к древесине и торфу с определением их комплексной эффективности.

Для дальнейших исследований отобран ряд составов, проявляющих различную огнезащитную и огнетушащую эффективность по отношению к прекращению горения природных горючих материалов (табл. 2). Варьирование химического состава и технологии получения синтезируемых продуктов предполагало изменение таких физико-химических свойств, влияющих на их огнезадерживающую эффективность, как температура начала плавления, вязкость расплавов, размер частиц твердой и жидкой составляющих ОС компонентов, устойчивость к воздействию влаги, термоизолирующая, теплопоглощающая способность, и поступление летучих азот- и фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу. Эти свойства ОС, реализующиеся в предпламенной зоне конденсированной фазы на различном удалении от поверхности горения, способны уменьшить скорость и количество поступления летучих горючих продуктов в пламенную зону. Для определения вклада газообразных ингибиторов в прекращение горения древесины и торфа в составе ОС изменяли содержание азота и фосфора. При этом предполагалось в результате проведения сопоставительных исследований физико-химических и огнепреграждающих свойств ОС найти факторы, вносящие определяющий вклад в ингибирование горения, и создать условия для реализации этих факторов.

Таблица 2. Химический состав ОС, огнезащитные и огнетушащие свойства по отношению к древесине и торфу
Table 2. Extinguishing agent chemical composition, fireproofing and fire extinguishing properties in relation to wood and peat

Состав Composition	Массовое соотношение компонентов ОС Mass ratio of FC components Al_2O_3: ZnO : MgO : CaO : P_2O_5 : B_2O_3: SiO_2 : NH_3 : K_2O : SO_3 : HCl	Огнезащитная, огнетушащая эффективность / Fire retardant, fire extinguishing efficiency				
		Удельный расход на тушение древесины, дм³/мг Specific consumption for wood quenching, dm³/mg	Температура отходящих газов при горении древесины, °С Temperature of waste gases during wood burning, °C	Потеря массы при горении древесины $\Delta m_д$, % Weight loss during wood burning Δm_w, %	Потеря массы при горении торфа $\Delta m_т$, % Weight loss during peat burning Δm_p, %	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 1 FC 1	1 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 0 : 1 : 3,9 : 0 : 0 : 0	0,2	267	8,6	5,8	14,6
ОС 2 FC 2	1 : 2,4 : 0 : 0 : 30,3 : 0,4 : 1 : 8,9 : 0 : 0 : 0	0,3	254	10,0	5,1	15,3
ОС 3 FC 3	0,32 : 0 : 0 : 0,8 : 14,9 : 0 : 1 : 10,1 : 2,4 : 0 : 2,6	0,1	179	6,2	1,8	8,1
ОС 4 FC 4	0,17 : 0 : 0 : 0 : 8 : 0,1 : 2,5 : 5,6 : 5,9 : 0	0,2	269	18,8	2,9	21,9
ОС 5 FC 5	0,17 : 0 : 0,5 : 0 : 11,8 : 0 : 1 : 4,51 : 3,5 : 0 : 2,3	0,2	317	8,7	1,1	10,0

Окончание Табл. 2 / End of Table 2

Состав Composition	Массовое соотношение компонентов ОС Mass ratio of FC components Al_2O_3: ZnO : MgO : CaO : P_2O_5 : B_2O_3: SiO_2 : NH_3 : K_2O : SO_3 : HCl	Огнезащитная, огнетушащая эффективность / Fire retardant, fire extinguishing efficiency				
		Удельный расход на тушение древесины, дм³/мг Specific consumption for wood quenching, dm³/mg	Температура отходящих газов при горении древесины, °С Temperature of waste gases during wood burning, °C	Потеря массы при горении древесины $\Delta m_д$, % Weight loss during wood burning Δm_w, %	Потеря массы при горении торфа $\Delta m_т$, % Weight loss during peat burning Δm_p, %	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 6 FC 6	0 : 0 : 0,7 : 1,03 : 13,6 : 0 : 0 : 6,65 : 0 : 0 : 2,9	0,2	275	4,2	4,2	8,6
Вода Water	—	0,5*	627	39,1	46,6	—
Вода + ПАВ Water + SAS	—	0,4*	627	39,0	47,0	—

* Тление возобновляется

* Smoldering resumes

Из полученных данных следует, что продукты, полученные из недефицитного минерального сырья, имеют различную комплексную эффективность, в связи с чем они представляют собой удобные объекты для выявления факторов, вносящих определяющий вклад в ингибирование горения древесины и торфа. По комплексной огнезащитной и огнетушащей эффективности синтезированные замедлители горения располагаются в следующий ряд: ОС 3 ≥ ОС 6 > ОС 5 > ОС 1 > ОС 2 > ОС 4. При этом для ОС 3 и ОС 6 характерна высокая эффективность как в случае древесины, так и в случае торфа, тогда как ОС 4 и ОС 5 при достаточно высокой эффективности по отношению к торфу менее эффективны при огнезащите древесины. Это обстоятельство учитывалось при выборе рецептуры состава комплексного действия.

Поскольку тление является причиной, затрудняющей борьбу с природными пожарами, проведены сопоставительные исследования температурных профилей в очагах горения древесины и торфа после тушения водой, водой с добавлением ПАВ и ОС-3 (табл. 3).

Как видно из полученных данных, только в случае применения ОС-3 удается существенно снизить температуру на поверхности природных горючих материалов и не допустить возникновения тления.

Исследованием физико-химических и термических свойств (температура начала образования и коэффициент растекаемости расплава, теплопоглощающая способность, средняя высота вспененного слоя) индивидуальных ОС установлено [103, 104], что прямая корреляция между этими процессами, протекающими в предпламенной зоне конденсированной фазы, и огнепреграждающей эффективностью ОС отсутствует. Аналогичный вывод следует из калориметрических исследований огнезащищенных древесины и торфа, где обнаружено несоответствие ряда комплексной эффективности с величи-

Таблица 3. Изменение температуры на поверхности горения древесины и торфа в зависимости от времени после тушения и природы огнетушащего средства

Table 3. Temperature change of wood and peat burning surface based on the time after extinguishing and type of extinguishing agent

ТГМ SCM	Время после тушения, мин Time after extinguishing, min	Температура, °С при использовании средства тушения Temperature, °C w/extinguishing agent		
		вода water	вода – ПАВ water – SAS	ОС-3 FC-3
Торф Peat	5	100	100	90
	15	150	150	150
	30	350	340	300
	45	400	390	330
	60	450	450	390
	75	320	320	170
	90	250	250	45*
Древесина Wood	5	200	180	100
	10	400	380	50*
	15	590	590	20
	20	630	620	20

* Тление отсутствует

* Smoldering absent

ной суммарного тепловыделения, что не позволяет однозначно установить один из исследованных процессов, протекающих в предпламенной зоне конденсированной фазы, как определяющий для прекращения горения.

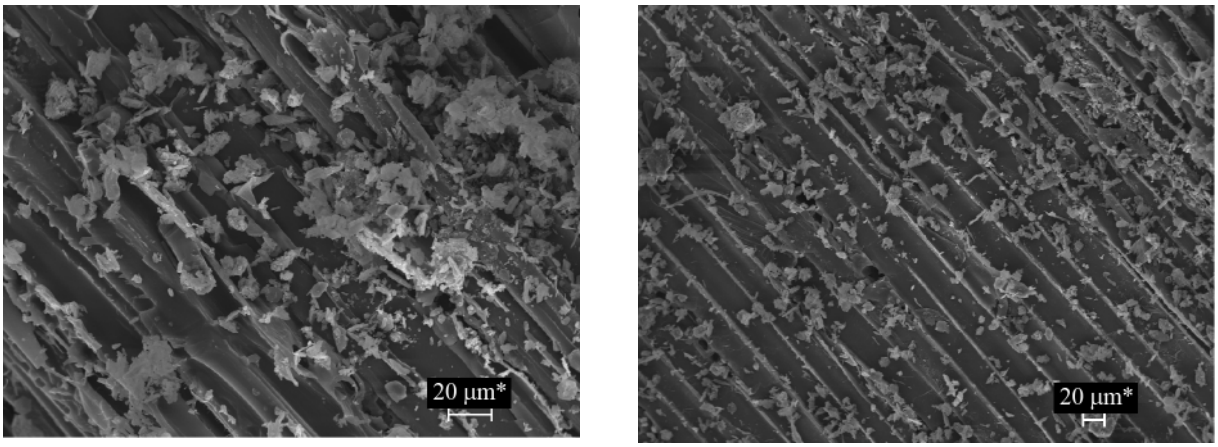
Вклад газофазных процессов в ингибирование горения ЛГМ определяли сопоставительными количественными исследованиями поступления в пламенную зону суммарного количества летучих азот- и фосфорсодержащих продуктов, образующихся в температурном интервале 200…500 °С при термолизе древесины и торфа, огнезащищенных составами различной комплексной эффективности (ОС 3, ОС 4, ОС 6) (табл. 4).

Данные о количественном поступлении летучих азот-фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу полностью совпадают с рядом комплексной эффективности ОС. Обращает на себя внимание тот факт, что суммарное количество летучих фосфорсодержащих продуктов в пламенную зону существенно меньше при близком суммарном содержании азота и фосфора в непрогретых огнезащищенных образцах. Этот факт свидетельствует о преимущественном участии фосфора в процессах взаимодействия с полимерной матрицей при термическом разложении и горении огнезащищенных ЛГМ. Напротив, данные об остаточном содержании азота в термообработанных в исследуемом температурном интервале образцах показывают практически полное его поступление в газовую фазу. Эти данные явились основанием для усовершенствования рецептуры ОС 3 путем изменения соотношения основных компонентов с использованием полного факторного эксперимента [102–105], в результате чего скорректирована рецептура исследуемого ОС в сторону повышения его эффективности путем увеличения в его составе N-содержащей компоненты. Полученные с применением математического аппарата результаты позволили подтвердить доминирующий фактор прекращения горения — ингибирование радикальных процессов в газовой фазе летучими азотсодержащими продуктами. Одновременно установлено, что азот в конденсированной фазе вступает во взаимодействие с фосфором и металлсодержащими компонентами минерального сырья с образованием каркасных термоизолирующих структур. Это позволяет утверждать, что в применении к ЛГМ синергизм синтетических азот-, металл- фосфорсодержащих соединений обусловлен изменением условий тепло- и массопереноса как в конденсированной, так и в газовой фазах.

Одним из важных эксплуатационных свойств огнезащитных средств, применяемых в природном комплексе, является их атмосферостойкость. Исходя из того, что исследуемые ОС представляют собой водные дисперсии, состоящие из частиц в микронном (нерастворимая составляющая) и нанодиапазоне (растворимая составляющая), проведены сопоставительные исследования размеров частиц ОС, проявляющих различную устойчивость к вымыванию [106, 107]. Найдено, что для наиболее стойкого к вымыванию ОС 6 характерно более высокое (в 1,5–1,6 раза) содержание мелкодисперсных частиц по сравнению с другими составами, что обеспечивает его более высокую проникаемость в пористую структуру древесины. Электронно-микроскопическими исследованиями срезов огнезащищенной древесины на глубине до 2 мм после суточного выдерживания огнезащищенных образцов в воде показано, что пористая структура древесины не просматривается (рис. 1). Это свидетельствует о прочном удерживании ОС 6 в поверхностном слое древесины. С этим утверждением согласуются данные по определению группы горючести выдержанных в воде образцов, которые сохранили первую группу огнезащитной эффективности. В соответствии с этим принято решение о том, что дальнейшие полигонные и натурные испытания атмосферостойкости, огнезащитной и огнетушащей эффективности по отношению к древесине и торфу проводить с использованием

Таблица 4. Суммарное поступление азота и фосфора в газовую фазу при термообработке огнезащищенных древесины и торфа
Table 4. Total nitrogen and phosphorus fed into gaseous phase during thermal treatment of fireproofed wood and peat

ОС EA	Содержание азота в непрогретом образце, г Nitrogen content in an unheated sample, g	Содержание фосфора в непрогретом образце, г Phosphorus content in an unheated sample, g	Суммарная потеря азота огнезащищенными ЛГМ, г Total nitrogen loss by fireproofed HCM, g	Суммарная потеря фосфора огнезащищенными ЛГМ, г Total phosphorus loss by fireproofed HCM, g	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 3 EA 3	14,2	15,8	23,2	4,2	8
ОС 4 EA 4	8,2	10,3	9,5	4,7	21,9
ОС 6 EA 6	10,0	7,3	17,2	2,6	8,6



a *b*

Рис. 1. Микроструктура поверхности древесины (масштаб — 20 мкм в 1 см): *a* — огнезащищенной; *b* — огнезащищенной, после испытаний на атмосферостойкость

Fig. 1. Wood surface microstructure (scale — 20 μm in 1 cm): *a* — fireproof; *b* — fireproof after weather resistance testing

ОС 6, получившим торговое название «Комплексил». Устойчивость «Комплексила» к воздействию атмосферных осадков проводили с использованием модельных очагов пожаров, которые соответствовали различным видам ЛГМ (сосновых, вересковых, мшистых и лишайниковых). Для испытаний использовали 10 % раствор ОС с расходом 1,5…2,0 л/м^2. Ширина огнезащитной полосы составляла 1,5 м, огнезащитный состав считался эффективным, если после воздействия атмосферных осадков глубина распространения фронта огня не превышала четверти от ширины зоны огнезащитной полосы. Установлено, что за весь период испытаний при общем количестве выпавших осадков 79 мм огнезащитные полосы сохранили устойчивость к распространению огня (рис. 2).

Огнетушащую эффективность «Комплексила» в сопоставлении с водой и водой с ПАВ определяли при тушении очага ранга 2А с площадью свободной поверхности 9,36 м^2 (табл. 5).

a *b* *c*

Рис. 2. Полигонные испытания огнезащитной эффективности ОС «Комплексил». Огнезащитная полоса: *a* — до испытаний; *b* — во время испытаний; *c* — после испытаний

Fig. 2. Field testing of Kompleksil fireproofing efficiency. Fireproofing strip: *a* — before testing; *b* — during testing; *c* — after testing

Таблица 5. Огнетушащая эффективность «Комплексила» при тушении модельного очага ранга 2А

Table 5. Fire extinguishing efficiency of Kompleksil in the extinguishing of a model fire bed having 2A rank

Огнетушащее средство Extinguishing agent	Расход на тушение, дм³ Agent consumption for extinguishing, dm³	Время тушения, с Extinguishing time, s	Время повторного воспламенения Reignition time
Вода / Water	10	44	500
Вода + 3 % ПАВ Water + 3 % SAS	8	35	510
«Комплексил» Kompleksil	3,3	26	—

Установлено, что тушение очага пожара класса А «Комплексилом» с гарантией отсутствия тления и повторного воспламенения осуществляется за более короткое время при меньшем (более чем в 2 раза) расходе ОС.

После тушения природного торфяника с исходной влажностью 38,2 % водой с ПАВ или «Комплексилом» проведены отборы проб торфа на различной глубине от поверхности горения с определением его влажности при использовании одного и того же количества (40 л) воды или ОС (табл. 6).

Установлено, что влажность торфа в небольшом поверхностном слое (5…20 см) не зависит от природы огнетушащего средства, однако, начиная с глубины более 20 см, его влажность при использовании воды с ПАВ снижается до уровня горимости. Наблюдение за очагами после тушения водой и «Комплексилом» проводилось в течение 3 сут. При использовании воды с добавкой ПАВ разогревание и тление торфа возобновилось, тогда как после применения «Комплексила» торфяной пожар был полностью локализован (рис. 3).

Применение химических средств огнезащиты и тушения пожаров в природном комплексе может оказать отрицательное влияние на лесные культуры. В соответствии с этим совместно с Институтом леса Национальной академии наук Беларуси проведены исследования по влиянию «Комплексила» на динамику содержания основных элементов питания в почве (азот, фосфор, калий) и в древесных растениях, а также на динамику показателей среднего диаметра и высоту культур сосны [108, 109].

Таблица 6. Изменение влажности торфа в зависимости от средства тушения

Table 6. Changes in peat moisture content depending on the extinguishing agent

Количество подач средства тушения Number of extinguishing agent feeds	Расход, л/м² Consumption, l/m²		Глубина отбора проб, см Sampling depth, cm	Влажность торфа, % Peat moisture content, %	
	вода + ПАВ water + SAS	«Комплексил» Kompleksil		вода + ПАВ water + SAS	«Комплексил» Kompleksil
1	11,7	10,9	0…5	56,1	58,2
2	9,2	10,2	6…10	59,5	58,4
3	9,5	9,7	11…20	62,2	67,3
4	9,6	9,2	21…30	43,0	75,4

Примечание: отбор проб осуществлялся на расстоянии 0,5 м от кромки пожара

Note: sampling was performed at the distance of 0.5 m from the fire edge

a *b* *c*

Рис. 3. Тушение торфяного пожара (*a*) и состояние торфяного очага через сутки после тушения водой с ПАВ (*b*) и «Комплексилом» (*c*)

Fig. 3. Peat fire extinguishing (*a*) and fire bed condition one day after the extinguishing using water with SAS (*b*) and Kompleksil (*c*)

По истечении пяти лет после применения ОС при прокладке огнезащитной полосы в посадке однолетней хвои выявлено, что средняя высота деревьев на экспериментальном и контрольном участках составила 5,5…10 м и 5,3…9,8 м, соответственно, а средний прирост по диаметру 15-летних культур сосны после огнезащитной обработки увеличился на 47 % по сравнению с 37 % на контрольном участке. Полученные результаты свидетельствуют, что негативное влияние «Комплексила» на рост и развитие культур сосны отсутствует, при этом отмечено качественное улучшение условий их питания.

Выводы

Таким образом, с использованием недефицитного минерального сырья разработана рецептура, технология получения и применения атмосферостойкого огнезащитно-огнетушащего состава «Комплексил», пригодного для борьбы с наземными и подземными природными пожарами. Установлен доминирующий фактор прекращения горения древесины и торфа — количественный выход летучих азотсодержащих продуктов в газовую фазу, что подтверждено методом полного факторного эксперимента. Это позволило повысить эффективность разрабатываемых продуктов синтеза при увеличении в них содержания азотсодержащей компоненты.

Одновременно с применением этого же метода обнаружено, что при ингибировании горения древесины и торфа наблюдается взаимное влияние факторов, проявляющееся в виде эффектов парного взаимодействия азота и фосфора, что свидетельствует о влиянии физических факторов, протекающих в предпламенной зоне конденсированной фазы, на условия тепло- и массопереноса, реализующееся при огневом воздействии на огнезащищенные природные твердые горючие материалы. Проведены полигонные и натурные испытания, где подтверждена высокая эффективность «Комплексила» не только в ликвидации пламенного горения, но и блокировании разогревания, что не менее важно для прекращения горения твердых горючих материалов, склонных к тлению и повторному воспламенению.

Проведением биометрических исследований огнезащищенных «Комплексилом» хвойных посадок в течение длительного периода показано положительное его влияние на рост лесных фитоценозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуцев Н.Д., Михайлова Н.В., Корчунова И.Ю.* Результаты сравнительных испытаний новых огнетушащих составов на модельных лесных пожарах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2013. № 4. С. 40–52. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/4-2013/spbniilh-proceedings-4-2013-4.pdf
2. *Абдурагимов И.М.* Еще раз о государственной проблеме тушения крупных лесных пожаров (в России и во всем мире) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 5–10. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829837
3. *Абдурагимов И.М.* Лесные пожары нельзя разбомбить // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 64–68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829846
4. *Popescu C.M., Pfriem A.* Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products — An overview // Fire and Materials. 2020. Vol. 44. No. 1. Pp. 100–111. DOI: 10.1002/fam.277
5. *Vakhitova L.N.* Fire retardant nanocoating for wood protection // Nanotechnology in Eco-efficient Construction. 2nd ed. Elsevier, 2019. Pp. 361–391. DOI: 10.1016/b978-0-08-102641-0.00016-5
6. *Гришин А.М., Якимов А.С.* Математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании и тлении торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 1. С. 151–167. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120113&ARTICLE_ID=131296
7. *Субботин А.Н.* О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 5. С. 159–165.
8. *Gani A., Naruse J.* Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass // Renewable energy. 2007. Vol. 32. No. 4. Pp. 694–661. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.017
9. *Фильков А.И.* Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2014. С. 15–207. URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000507638
10. *Гришин А.М.* Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1. С. 41–49.
11. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М. : Академия ГПС СЧ России. 2010, С. 1–160.

12. *Алешина А.А., Глазкова С.В., Луговская Л.А.* Современные представления о строении целлюлоз (обзор) // Химия растительного сырья. 2001. № 1. С. 5–36. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9337129
13. *Лиштван И.И., Капуцкий Ф.Н., Янута Ю.Г., Абрамец А.М., Навоша Ю.Ю.* Структура фракций гуминовых кислот торфа // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2005. № 2. С. 108–113. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29021742
14. *Гюльмалиев А.М., Гагарин С.Г., Головин Г.С.* Структура и свойства органической массы горючих ископаемых // Химия твердого топлива. 2004. № 6. С. 10–31. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17709959
15. *Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Filkov A.I.* Energetic potential and kinetic behavior of peats // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 117. No. 3. Pp. 1497–1508. DOI: 10.1007/s10973-014-3912-2
16. *Касымов Д.П.* Экспериментальное исследование заглубления фронта горения в слой торфа различного ботанического состава // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 1. С. 241–246.
17. *Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А.* Термический анализ древесины основных лесообразующих пород средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30. DOI: 10.15372/SJFS20150602
18. *Antal M.J.Jr., Varhegyi G.* Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1995. Vol. 34. No. 3. Pp. 703–717. DOI: 10.1021/ie00042a001
19. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 19–32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710
20. *Тарновская Л.И.* Изменения химического состава гуминовых кислот в процессе термолиза торфа // Химия твердого топлива. 1994. № 4–5. С. 33–39.
21. *Чухарева Н.В., Маслов С.Г.* Адсорбционные свойства термически модифицированного торфа и полученных на его основе активных углей // Химия растительного сырья. 2011. № 1. С. 169–174. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15859232
22. *Лиштван И.И., Король Н.Т.* Основные свойства торфа и методы их определения. Минск : Наука и техника, 1985. 168 с.
23. *Freitas J.C., Banagamba T.J., Emmerich F.G.* 13C high-resolution solid-state NMR study of peat carbonization // Energy Fuels. 1999. Vol. 13. No. 1. Pp. 53–59. DOI: 10.1021/ef980075c
24. *Мазалов Ю.А., Мелешко В.Ю., Павловец Г.Я.* Моделирование и основы регулирования процесса горения гетерогенных конденсированных систем. М. : Военная академия РВСН им. П. Великого, 2001. 291 с.
25. *Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 174 с. URL: https://academygps.ru/upload/iblock/a9a/a9a75968da58abd69a9d9578481b96f6.pdf
26. *Хорошавин Л.Б., Медведев О.А., Беляков В.А., Михеева Е.В., Рудков В.С., Байтимирова Е.А.* Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты. М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. С. 74–172. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19421097
27. *Абдурагимов И.М.* Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 69–74. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829847
28. *Weil E.D.* Fire-protective and flame-retardant coatings — a state-of-the-art review // Journal of Fire Sciences. 2011. Vol. 2. No. 3. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
29. *Асеева Р.М., Заиков Г.Е.* Горение полимерных материалов. М. : Наука, 1981. 280 с.
30. *Liodakis S., Tsapara V., Agiovlasitis I.P., Vorisis D.* Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants // Thermochimica Acta. 2013. Vol. 568. Pp. 156–160. DOI: 10.1016/j.tca.2013.06.011
31. *Тарахно А.В., Шаршанов А.Я.* Физико-химические основы использования воды в пожарном деле. Харьков : Акад. гражд. защиты Украины, 2004. 252 с.
32. *Liping Li, Hongdan Hu, Haiqing Hu.* Effect of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloxyl) propyltrimethoxy silane on the flammability and thermal degradation of pine-needles // Polymers and Polymer Composites. 2014. Vol. 22. No. 9. Pp. 837–842. DOI: 10.1177/096739111402200911

33. *Лобанов Ф.И.* Использование полимерных материалов в пожаротушении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 1. С. 64–68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868664
34. *Дауэнгауэр С.А.* Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 6. С. 78–81. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives
35. *Брушлинский Н.Н., Мешалкин Е.А., Усманов М.Х., Семенов В.П., Соловьев Д.В., Стецюк В.Ф. и др.* Оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих материалов и веществ на открытом пространстве при использовании огнезащитных устройств // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2003. № 3. С. 42–46. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-tusheniya-pozharov-tverdyh-goryuchih-materialov-i-veschestv-na-otkrytom-prostranstve-pri-ispolzovanii
36. *Баратов А.Н., Иванов Е.Н.* Роль химических и термических факторов при гетерогенном ингибировании различных пламен // ДАН СССР. 1987. Т. 293. № 4. С. 892–895.
37. *Антонов Д.В., Войтков И.С., Волков Р.С., Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Хасанов И.Р. и др.* Влияние специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 9. С. 5–16. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16
38. *Liodakis S., Antonopoulos I., Tsapara V.* Forest fire retardancy evaluation of carbonate minerals using DTG and LOI // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2009. Vol. 96. Pp. 203–209. DOI: 10.1007/s10973-008-9378-3
39. *Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н., Куприн Д.С.* Быстротвердеющие пены — новая эра в борьбе с лесными пожарами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 7–13. DOI: 10.25257/FE.2016.2.7-13
40. *Киреев А.А., Тарасова Г.В., Жерноклев К.В.* Исследование массовой скорости выгорания древесины, огнезащищенной гелеобразующей системой $MgCl_2 \cdot Na_2O \cdot 2{,}7\ SiO_2$ // Вестник национального технического университета ХПИ. 2006. № 43. С. 65–70.
41. *Vinogradov A.V., Kuprin D.S., Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Serebriyakov E.*, *Vinogradov V.V.* Silica foams for fire prevention and firefighting // Applied Materials and Interfaces. 2016. Vol. 8. No. 1. Pp. 294–301. DOI: 10.1021/acsami.5b08653
42. *Москвилин Е.А., Родионов Е.С., Ерохин С.П., Волков И.В.* Борьба с лесными пожарами путем создания заградительных полос методом нанесения быстро твердеющей пены // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. № 41. С. 62–64. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23366055
43. *Копылов Н.П., Москвилин Е.А., Федоткин Д.Н., Стрижак П.А.* Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // Лесотехнический журнал. 2016. № 4. С. 62–66. DOI: 10.12737/23436
44. *Ивченко О.А., Панкин К.Е.* Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 76–84. DOI: 10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560
45. *Крупкин В.Г., Мохин Г.Н., Халтуринский Н.А.* Моделирование образования многослойной структуры огнезащитными вспучивающимися составами при воздействии пожара // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 8. С. 202–206. URL: http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3587
46. *Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А.* Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30
47. *Lewin M.* Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88. Issue 1. Pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2003.12.011
48. *Корольченко А.Я., Гаращенко А.Н., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П.* Расчеты толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 3. С. 49–56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629
49. *Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С.* Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // Труды Санкт-Пе-

тербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 2. С. 56–73. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2014-full/spbniilh-proceedings-2-2014-7.pdf

50. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (Обзор) // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87. Вып. 10. С. 1385–1399. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43059371
51. *Анцупов Е.В., Радивилов С.М.* Снижение горючести деревянных конструкций пропиточными составами // Горение и плазмохимия. 2011. Т. 9. № 1. С. 43–50. URL: http://cpc.icp.kz/index.php/cpc/article/view/232
52. *Демчина Р.А., Грынькив А.С., Федына М.Ф., Бэхта П.А.* Новый антипирен для древесины на основе конденсированных соединений фосфора, азота и бора // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013. Вып. 37. С. 155–160. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21267736
53. *Леонович А.А., Шелоумов А.В.* Сравнительный анализ эффективности огнезащитных средств на примере древесных материалов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. Вып. 204. С. 161–171. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21394469
54. *Гуцев Н.Д., Михайлова Н.В.* Разработка методик лабораторных исследований огнетушащих растворов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 2. С. 55–70. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2015/spbniilh-proceedings-2-2015-5-full.pdf
55. *Laurichesse S., Avérous L.* Chemical modification of lignins: towards biobased polymers // Progress in Polymer Science. 2014. Vol. 39. No. 7. Pp. 1266–1290. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004
56. *Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П.* Горение и свойства горючих веществ. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1981. 272 с.
57. *Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б., Тодес О.М., Франк-Каменецкий Д.А., Кондратьев В.Н., Загулин А.В.* Теория горения и взрыва / отв. ред. Ю.В. Фролов. М. : Наука, 1981. 411 с.
58. *Портнов Ф.А.* Влияние модификаторов на характеристики пенококса, образующегося при термическом разложении древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 4. С. 24–30. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.24-31
59. *Guo C., Wang S., Wang Q.* Synergistic effect of treatment with disodium octaborate tetrahydrate-and guanyl urea phosphate on flammability of pine wood // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76. No. 5. Pp. 213–220. DOI: 10.1007/s00107-017-1171-1
60. *Tsapko Y., Tsapko A.* Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. No. 10 (87). Pp. 50–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
61. *Степина И.В., Котлярова И.А., Мясоедов Е.М., Сидоров В.И.* Термодеструкция в атмосфере азота древесины сосны, модифицированной боразотными соединениями // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 83–90. DOI: 10.14258/jcprm.1303083
62. *Анохин Е.А., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б.* Применение огнезащитных пропиточных композиций для снижения пожарной опасности деревянных конструкций с различными сроками эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 2. С. 22–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35
63. *Carosio F., Kochumalayil J., Cuttca F., Camino G., Berglund L.* Oriented clay nanopaper from biobased components—mechanisms for superior fire protection properties // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 7. No. 10. Pp. 5847–5856. DOI: 10.1021/am509058h
64. *Pappa A., Mikedi K., Tzamtzis N., Statheropoulos M.* TG-MS analysis for studying the effects of fire retardants on the pyrolysis of pine-needles and their components // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2006. Vol. 84. Pp. 655–661. DOI: 10.1007/s10973-005-7201-y
65. *Alongi J., Ciobanu M., Malucelli G.* Novel flame retardant finishing systems for cotton fabrics based on phosphorus-containing compounds and silica derived from sol–gel // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 85. No. 3. Pp. 599–608. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.03.024
66. *Покровская Е.Н., Кобелев А.А., Нагановский Ю.К.* Механизм и эффективность огнезащиты фосфоркремнийорганических систем для древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2009. Т. 18. № 3. С. 44–48. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12772426
67. *Agueda A., Pastor E., Perez Y., Viegas D.X., Planas E.* Fire intensity reduction in straw fuel beds treated with a long-term retardant // Fire Safety Journal. 2011. Vol. 46. No. 1–2. Pp. 41–47. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.11.003

68. *Baysal E., Altinak M., Colak M., Ozaki S., Toker H.* Fire resistance of Douglas fir (Pseudotsuga menzieesi) treated with borates and natural extractives // Bioresource Technology. 2007. Vol. 98. No. 5. Pp. 1101–1105. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.04.023
69. *Раковский В.Е., Пигулевская Л.В.* Химия и генезис торфа / под ред. А.В. Лазарева. М. : Недра, 1978. 231 с.
70. *Чулюков М.А., Чайков В.И.* Торфяные пожары и меры борьбы с ними. М. : Наука, 1969. 113 с.
71. *Никитин Ю.А., Рубцов В.Ф.* Предупреждение и тушение пожаров в лесах и на торфяниках. М. : Россельхозиздат, 1986. 95 с.
72. *Усеня В.В.* Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель : ИЛ НАНРБ, 2002. 205 с.
73. *Фалюшин П.А.* О механизме распространения очага горения в торфе // Природопользование. 2011. Вып. 19. С. 204–206. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42457628
74. *Filkov A.I., Kuzin A.Ya., Sharypov O.V., Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E. et al.* Comparative study to evaluate the drying kinetics of boreal peats from micro to macro scales // Energy Fuels. 2012. Vol. 26. No. 1. Pp. 349–356. DOI: 10.1021/ef201221y
75. *Субботин А.Н.* Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 5. С. 42–49. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513104
76. *Вонский С.М., Наумов В.Б., Жданко В.А.* Лесные пожары и способы их тушения. Л. : ЛенНИИЛХ, 1989. 56 с.
77. *Лиштван И.И.* Выбор ПАВ для улучшения смачиваемости высушенного торфа // Коллоидный журнал. 1984. Т. 46. № 1. С. 29–36.
78. *Кустов М.В., Калугин В.Д.* Проблемы повышения огнетушащей способности растворных систем на основе воды // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. М., 2008. С. 188–190.
79. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Увеличение эффективности огнезащитных составов для древесины путем регулирования химических реакций в конденсированной фазе // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2008. Т. 7. № 1. С. 50–57. URL: https://journals.ucp.by/index.php/vice/article/view/276
80. *Ломакин С.М., Заиков Г.Е., Микитаев А.К., Кочнев А.М., Стоянов О.В., Шкодич В.Ф., Наумов С.В.* Замедлители горения для полимеров // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. Вып. 7. С. 71–86. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17680920
81. *Dasari A., Zhong-Zhen Yu, Gui-Peng Cai, Yiu-Wing Mai.* Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials // Progress in Polymer Science. 2013. Vol. 38. No. 9. Pp. 1357–1387. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.06.006
82. *Aksit A., Onar N., Kutlu B., Sergin E., Yakin I.* Synergistic effect of phosphorus, nitrogen and silicon on flame retardancy properties of cotton fabric treated by sol-gel process // International Journal of Clothing Science and Technology. 2016. Vol. 28. No. 3. Pp. 319–327. DOI: 10.1108/IJCST-03-2016-0029
83. *Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph.* New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2009. Vol. 63. No. 3. Pp. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002
84. *Lowden L.A., Hull T.R.* Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. No. 4. Pp. 1–19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
85. *Xinyan Huang, Rein G.* Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics // Combustion and Flame. 2014. Vol. 161. No. 6. Pp. 1633–1644. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.12.013
86. *Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X.* Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // Fuel. 2009. Vol. 88. No. 6. Pp. 1024–1030. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.10.034
87. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Регулирование физико-химических свойств композиций на основе фосфатов металлов-аммония, проявляющих огнезащитный и огнетушащий эффект // Свиридовские чтения : сб. ст. / отв. ред. Т.Н. Воробьева. Вып. 7. Минск, 2011. С. 21–27. URL: http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996
88. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Исследование огнезащитной эффективности составов на основе аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов в зависимости от условий получения // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. 2009. Вып. 1. С. 34–39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574185

89. *Сычев М.М.* Перспектива использования золь-гель метода в технологии неорганических материалов // Журнал прикладной химии. 1990. Т. 63. № 3. С. 489–499.
90. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А.* Огнезадерживающие свойства металлофосфатных суспензий на основе природного сырья // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : сб. науч. тр. Минск : Бел. навука, 2011. С. 272–284.
91. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А.* Разработка синтетического состава комплексного действия для огнезащиты и тушения природных горючих материалов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2012. № 1 (31). С. 53–61. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26295113
92. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Синтез замедлителей горения для древесины и торфа на основе природных минералов и их физико-химические свойства // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск: Полимерные материалы пониженной горючести. 2013. № 8 (145). С. 232–236. URL: http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3617
93. *Богданова В.В., Кобец О.И. Людко А.А.* Исследование огнезащитных и огнетушащих свойств суспензий ортофосфатов, полученных на основе природных минералов // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 9. Минск, 2013. С. 28–36. URL: http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358
94. *Богданова В.В., Лахвич В.В., Врублевский А.В., Дмитриченко А.С.* Огнетушащая эффективность жидкостных химических составов при тушении пожаров класса А распылительными устройствами пожаротушения // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2008. № 1 (7). С. 35–41. URL: https://vestnik.ucp.by/ru/archive
95. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А.* Экономичные огнезащитно-огнетушащие суспензии на основе природного металлосиликатного сырья // Инновации в науке, промышленности и образовании : сб. мат. науч.-техн. конф. Витебск, 2010. С. 140–144.
96. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А.* Температурный профиль в модельных очагах торфа при его тушении синтетическими жидкостными составами // XXIV Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания института : сб. В 2-х ч. Ч. 2. М. : ВНИИПО, 2012. С. 71–74.
97. *Людко А.А., Богданова В.В., Кобец О.И.* Методика определения растекаемости расплавов огнетушащих химических составов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : мат. междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 24–25 мая 2012 г. В 2-х ч. Ч. 1. Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. С. 190–191.
98. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
99. *Марченко З.* Фотометрическое определение элементов / пер. с пол. И.В. Матвеевой и А.А. Немодрука ; под ред. Ю.А. Золотова. М. : Мир, 1971. 502 с.
100. *Богданова В.В., Кобец О.И., Усеня В.В., Матюха С.Л., Гордей Н.В.* Разработка и огнезащитно-огнетушащая эффективность нового унифицированного состава на основе местного сырья для борьбы с пожарами в лесном комплексе // Труды БГТУ. № 1: Лесное хозяйство. 2014. № 1. С. 55–58. URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/11427
101. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А.* Исследование физико-химических и огнепреграждающих свойств синтетических суспензий на основе трепела и бентонита // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : сб. тез. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. Минск : Бел. навука, 2013. С. 151–160.
102. *Богданова В.В., Кобец О.И., Кирлица В.П.* Механизм и синергическое действие азот-фосфорсодержащих антипиренов при огнезащите и тушении древесины и торфа // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 4. С. 57–63. DOI: 10.7868/S0207401X16040038
103. *Богданова В.В., Кобец О.И., Бурая О.Н.* Направленное регулирование огнезащитной и огнетушащей эффективности N-P-содержащих антипиренов в синтетических и природных полимерах // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 2. С. 106–115. DOI: 10.30826/CE19120214
104. *Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А., Кирлица В.П.* Оптимизация огнезащитно-огнетушащих свойств состава для предотвращения и локализации пожаров в природном комплексе методом математического планирования эксперимента // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2012. № 1 (15). С. 32–39. URL: https://vestnik.ucp.by/ru/archive
105. *Богданова В.В., Кобец О.И., Кирлица В.П.* Применение полного факторного эксперимента для определения механизма ингибирующего действия огнепреграждающих средств // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 10. Минск, 2014. С. 23–38. URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/106529

106. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Атмосферостойкий огнезащитно-огнетушащий состав для предотвращения и тушения пожаров в природном комплексе // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 13. Минск, 2017. С. 31–40. URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/228556
107. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Ресурсосберегающий огнезащитно-огнетушащий состав «Комплексил» для предотвращения и тушения пожаров в природном комплексе // Альтернативные источники сырья и топлива : сб. науч. тр. Вып. 3. Минск : Бел. навука, 2018. С. 91–100.
108. *Богданова В.В., Кобец О.И., Усеня В.В., Гордей Н.В., Матюха С.Л.* Исследование физико-химических и огнепреграждающих свойств синтетических составов по отношению к древесине и торфу // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Вып. 74. Гомель : ИЛ НАН Б, 2014. С. 491–501.
109. *Усеня В.В., Гордей Н.В., Маркевич Т.С., Тегленков Е.А.* Лесоводственно-экологические аспекты применения химического состава «Комплексил» для борьбы с пожарами в природном комплексе Республики Беларусь // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Вып. 76. Гомель : ИЛ НАН Беларуси, 2016. С. 543–552.

REFERENSES

1. Gutsev N.D., Mikhailova N.V., Korchunova I.Yu. The results of field tests of new fire extinguishing compositions. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2013; 4:40-52. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/4-2013/spbniilh-proceedings-4-2013-4.pdf (rus).
2. Abduragimov I.M. Once again about the state problem of extinguishing of large forest fires (in Russia and all over the world). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):5-10. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829837 (rus).
3. Abduragimov I.M. Forest fire can't be destroyed by bombing. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):64-68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829846 (rus).
4. Popescu C.M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products — An overview. *Fire and Materials*. 2020; 44(1):100-111. DOI: 10.1002/fam.277
5. Vakhitova L.N. Fire retardant nanocoating for wood protection. *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. 2nd ed. Elsevier, 2019; 361-391. DOI: 10.1016/b978-0-08-102641-0.00016-5
6. Grishin A.M., Yakimov A.S. Mathematical modelling of thermophysical processes at peat firing and smoldering. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2010; 17(1):137-153. DOI: 10.1134/S0869864310010166
7. Subbotin A.N. Special features of propagation of peat fire. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2003; 76(5):1145-1153. DOI: 10.1023/B:JOEP.0000003233.96639.ff
8. Gani A., Naruse J. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable energy*. 2007; 32(4):694-661. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.017
9. Filkov A.I. *Physical and mathematical modeling of the occurrence of natural fires.* Tomsk, Tomsk State University Publishing House, 2014; 15-207. URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000507638 (rus).
10. Grishin A.M. General mathematical models of forest and peat fires and their applications. *Mechanical successes*. 2002; 1:41-49. (rus).
11. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Combustion of wood and its fire hazard properties*. Moscow, Academy of State Fire Service of the MF Russia, 2010; 1-160. (rus).
12. Aleshina A.A., Glazkova S.V., Lugovskaya L.A. Modern ideas about the structure of cellulose (review). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja/Chemistry of vegetable raw materials*. 2001; 1:5-36. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9337129 (rus).
13. Lishtvan I.I., Kaputsky F.N., Yanuta Yu.G., Abramets A.M., Navosha Yu.Yu. The structure of peat humic acid fractions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*. 2005; 2:108-113. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29021742 (rus).
14. Gyulmaliev A.M., Gagarin S.G., Golovin G.S. The structure and properties of the organic matter of fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*. 2004; 38(6):1-22.
15. Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Filkov A.I. Energetic potential and kinetic behavior of peats. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2014; 117(3):1497-1508. DOI: 10.1007/s10973-014-3912-2
16. Kasymov D.P. Experimental investigation of the deepening of the combustion front into peat layers different in botanical composition. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017; 90(1):241-246. DOI: 10.1007/s10891-017-1559-0

17. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal analysis of wood of the main tree species of central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science)*. 2015; 6:17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602 (rus).
18. Antal M.J.Jr., Varhegyi G. Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1995; 34(3):703-717. DOI: 10.1021/ie00042a001
19. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Combustion and fire hazard of wood. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):19-32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710 (rus).
20. Tarnovskaya L.I. Changes in the chemical composition of humic acids in the process of peat thermolysis. *Solid Fuel Chemistry*. 1994; 4-5:33-39. (rus).
21. Chukhareva N.V., Maslov S.G. Adsorption properties of thermally modified peat and activated carbons obtained on its basis. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja/Chemistry of vegetable raw materials*. 2011; 1:169-174. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15859232 (rus).
22. Lishtvan I.I., Korol' N.T. *The main properties of peat and methods for their determination*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985; 168. (rus).
23. Freitas J.C., Banagamba T.J., Emmerich F.G. 13C high-resolution solid-state NMR study of peat carbonization. *Energy Fuels*. 1999; 13(1):53-59. DOI: 10.1021/ef980075c
24. Mazalov Yu.A., Meleshko V.Yu., Pavlovets G.Ya. Modeling and basics of regulation of the combustion process of heterogeneous condensed systems. Moscow, Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, 2001; 291. (rus).
25. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Physicochemical bases of development and extinguishing of fires.* Moscow, Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, 2014; 174. URL: https://academygps.ru/upload/iblock/a9a/a9a75968da58abd69a9d9578481b96f6.pdf (rus).
26. Khoroshavin L.B., Medvedev O.A., Belyakov V.A., Mikheeva E.V., Rudkov V.S., Baitimirova E.A. *Peat: peat fire, peat extinguishing and peat composites.* Moscow, FGBU VNII GOChS (FC), 2013; 74-172. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19421097 (rus).
27. Abduragimov I.M. The problem of extinguishing large forest fires and large-scale fires of solid combustible materials in buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):69-74. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829847 (rus).
28. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review. *Journal of Fire Sciences*. 2011; 2(3):259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469
29. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Combustion of polymeric materials*. Moscow, Nauka Publ., 1981; 280. (rus).
30. Liodakis S., Tsapara V., Agiovlasitis I.P., Vorisis D. Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants. *Thermochimica Acta.* 2013; 568:156-160. DOI: 10.1016/j.tca.2013.06.011
31. Tarakhno A.V., Sharshanov A.Ya. *Physicochemical bases of water use in fire fighting.* Kharkov, Acad. citizen protection of Ukraine, 2004; 252. (rus).
32. Liping Li, Hongdan Hu, Haiqing Hu. Effect of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloxyl) propyltrimethoxy silane on the flammability and thermal degradation of pine-needles. *Polymers and Polymer Composites*. 2014; 22(9):837-842. DOI: 10.1177/096739111402200911
33. Lobanov F.I. Utilization of polymer materials in fire extinguishing process Lobanov. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 1:64-69. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868664 (rus).
34. Dauengauer S.A. Fire extinguishing with fine-dispersed water: mechanism, characteristics, perspectives. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 6:78-81. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives (rus).
35. Brushlinsky N.N., Meshalkin E.A., Usmanov M.Kh., Semenov V.P., Solov'ev D.V., Stetsyuk V.F. et al. Evaluation of the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible materials and substances in an open space using fire protection devices. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2003; 3:42-46. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-tusheniya-pozharov-tverdyh-goryuchih-materialov-i-veschestv-na-otkrytom-prostranstve-pri-ispolzovanii (rus).
36. Baratov A.N., Ivanov E.N. The role of chemical and thermal factors in heterogeneous inhibition of various flames. *DAN SSSR / Reports AS SU*. 1987; 293(4):892-895. (rus).
37. Antonov D.V., Voitkov I.S., Volkov R.S., Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Khasanov I.R. et al. Influence of specialized additives on the efficiency of localization of flame burning and thermal decomposition of forest fuel materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(9):5-15. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16 (rus).
38. Liodakis S., Antonopoulos I., Tsapara V. Forest fire retardancy evaluation of carbonate minerals using DTG and LOI. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009; 96:203-209. DOI: 10.1007/s10973-008-9378-3

39. Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Kuprin D.S. Fast-hardening foams — a new era in fighting forest fires. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2016; 2:7-13. DOI: 10.25257/FE.2016.2.7-13 (rus).
40. Kireev A.A., Tarasova G.V., Zhernoklev K.V. Investigation of the mass burning rate of wood with a fire-resistant gel-forming system $MgCl_2 \cdot Na_2O \cdot 2.7\ SiO_2$. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: "Informatics and Modeling"*. 2006; 43:65-70. (rus).
41. Vinogradov A.V., Kuprin D.S., Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Serebriyakov E., Vinogradov V.V. Silica foams for fire prevention and firefighting. *Applied Materials and Interfaces*. 2016; 8(1):294-301. DOI: 10.1021/acsami.5b08653
42. Moskvilin E.A., Rodionov E.S., Erokhin S.P., Volkov I.V. Fight against forest fires by creation of protecting strips by method of putting quickly hardening foam. *Actual problems of the forest complex.* 2015; 41:62-64. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23366055 (rus).
43. Kopylov N.P., Moskvilin E.A., Fedotkin D.N., Strizhak P.A. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires efficiency extinguish using aviation. *Forestry Engineering Journal*. 2016; 4:62-66. DOI: 10.12737/23436 (rus).
44. Ivchenko O.A., Pankin K.E. Extinguishing forest flammable materials with hydrogels based on aluminum hydroxide. *Forestry Engineering Journal*. 2019; 1:76-84. DOI: 10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560 (rus).
45. Krupkin V.G., Mokhin G.N., Khalturinsky N.A. Modeling of the formation of multilayered structure by fire-retardant intumescent coatings under the influence of a fire. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences.* 2013; 8:202-206. URL: http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3587 (rus).
46. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2019; 28(2):9-30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30 (rus).
47. Lewin M. Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers. *Polymer Degradation and Stability.* 2005; 88(1):13-19. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2003.12.011
48. Korolchenko A.Ya., Garashchenko A.N., Garashchenko N.A., Rudzinsky V.P. Calculations of the thickness of fire protection, providing the required indicators of fire hazard of wood-glued structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):49-56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629 (rus).
49. Gusev V.G., Arzybashev E.S. Researches Saint-Petersburg Forestry Research Institute in the field of protection of forests from fires. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2014; 2:56-73. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2014-full/spbniilh-proceedings-2-2014-7.pdf (rus).
50. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis and physicochemical properties of di- and trivalent metal-ammonium phosphates. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014; 87(10):1385-1399. DOI: 10.1134/S1070427214100012
51. Antsupov E.V., Radivilov S.M. Combustibility degradation of wooden construction members with impregnating compounds. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2011; 9(1):43-50. URL: http://cpc.icp.kz/index.php/cpc/article/view/232 (rus).
52. Demchina R.A., Grynjkiv A.S., Fedyna M.F., Behta P.A. New flame retardant for a wood based on the condensed compounds of phosphorous, nitrogen and boron. *Actual problems of the forest complex.* 2013; 37:155-160. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21267736 (rus).
53. Leonovich A.A., Sheloumov A.V. The comparative analysis of flameretardant means effectiveness on example of the wood materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii.* 2013; 204:161-171. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21394469 (rus).
54. Gutsev N.D., Mihailova N.V. Development of methods of laboratory research of fire extinguishing water solutions. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2015; 2:55-70. URL: http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2015/spbniilh-proceedings-2-2015-5-full.pdf (rus).
55. Laurichesse S., Averous L. Chemical modification of lignins: towards biobased polymers. *Progress in Polymer Science.* 2014; 39(7):1266-1290. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004
56. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. *Combustion and properties of combustible substances*. 2nd ed., rev. Moscow, Khimiya Publ., 1981; 272. (rus).
57. Zeldovich Ya.B., Khariton Yu.B., Todes O.M., Frank-Kamenetskiy D.A., Kondrat'ev V.N., Zagulin A.V. *Combustion and explosion theory* / Yu.V. Frolov (executive ed). Moscow, Nauka Publ., 1981; 258. (rus).
58. Portnov F.A. Influence of modifiers on coked foam structure and properties formed with thermal decomposition of wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(4):24-30. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.24-31 (rus).

59. Guo C., Wang S., Wang Q. Synergistic effect of treatment with disodium octaborate tetrahydrateand guanyl urea phosphate on flammability of pine wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018; 76(5):213-220. DOI: 10.1007/s00107-017-1171-1
60. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 3:10(87):50-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
61. Stepina I.V., Kotliarova I.A., Miasoedov E.M., Sidorov V.I. Hermal destruction in a nitrogen atmosphere pine wood modified bornitrogen compounds. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja/Chemistry of vegetable raw materials.* 2013; 3:83-90. DOI: 10.14258/jcprm.1303083 (rus).
62. Anokhin E.A., Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B. Use of fire-retardant impregnating compositions for reducing fire hazard of wooden structures of various lifetimes. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2017; 26(2):22-35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35 (rus).
63. Carosio F., Kochumalayil J., Cuttca F., Camino G., *Berglund L.* Oriented clay nanopaper from biobased components-mechanisms for superior fire protection properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016; 7(10):5847-5856. DOI: 10.1021/am509058h
64. Pappa A., Mikedi K., Tzamtzis N., Statheropoulos M. TG-MS analysis for studying the effects of fire retardants on the pyrolysis of pine-needles and their components. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006; 84: 655-661. DOI: 10.1007/s10973-005-7201-y
65. Alongi J., Ciobanu M., Malucelli G. Novel flame retardant finishing systems for cotton fabrics based on phosphorus-containing compounds and silica derived from sol-gel. *Carbohydrate Polymers*. 2011; 85(3):599-608. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.03.024
66. Pokrovskaya E.N., Kobelev A.A., Naganovsky Yu.K. Mechanism and efficiency of fire protection of organophosphorus systems for wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 18(3):44-48. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12772426 (rus).
67. Agueda A., Pastor E., Perez Y., Viegas D.X., Planas E. Fire intensity reduction in straw fuel beds treated with a long-term retardant. *Fire Safety Journal*. 2011; 46(1-2):41-47. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.11.003
68. Baysal E., Altinak M., Colak M., Ozaki S., Toker H. Fire resistance of Douglas fir (Pseudotsuga menzieesi) treated with borates and natural extractives. *Bioresource Technology*. 2007; 98:1101-1105. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.04.023
69. Rakovsky V.E., Pigulevskaya L.V. *Chemistry and genesis of peat* / A.V. Lazareva (ed.). Moscow, Nedra Publ., 1978; 231. (rus).
70. Chulyukov M.A., Chaikov V.I. *Peat fires and measures to combat them*. Moscow, Nauka Publ., 1969; 113. (rus).
71. Nikitin Yu.A., Rubtsov V.F. *Prevention and suppression of fires in forests and peat bogs*. Moscow, Rossel'hozizdat Publ., 1986; 95. (rus).
72. Usenya V.V. *Forest fires, consequences and fight against them*. Gomel, Forest Institute NASRB, 2002; 202. (rus).
73. Falushin P.A. On the mechanism of burning centre distribution in peat. *Nature management*. 2011; 19:204-206. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42457628 (rus).
74. Filkov A.I., Kuzin A.Ya., Sharypov O.V., Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E. et al. Comparative study to evaluate the drying kinetics of boreal peats from micro to macro scales. *Energy Fuels.* 2012; 26(1):349-356. DOI: 10.1021/ef201221y
75. Subbotin A.N. Propagation of a peat fire under various conditions of heat and mass transfer with the external environment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(5):42-49. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513104 (rus).
76. Vonsky S.M., Naumov V.B., Zhdanko V.A. *Forest fires and methods of extinguishing them*. Leningrad, Leningrad Research Institute of Wood Chemistry, 1989; 56. (rus).
77. Lishtvan I.I. The choice of surfactants to improve the wettability of dried peat. *Colloid Journal*. 1984; 46(1):29-36. (rus).
78. Kustov M.V., Kalugin V.D. Problems of increasing the fire extinguishing capacity of water-based mortar systems. *Actual problems of fire safety : materials of the International Scientific and Practical Conference.* Part 1. Moscow, 2008; 188-190. (rus).
79. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Increasing the effectiveness of fire retardants for wood by regulating chemical reactions in the condensed phase. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2008; 7(1):50-57. URL: https://journals.ucp.by/index.php/vice/article/view/276 (rus).

80. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Flame retardants for polymers. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2012; 15(7):71-86. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17680920 (rus).
81. Dasari A., Zhong-Zhen Yu, Gui-Peng Cai, Yiu-Wing Mai. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. 2013; 38(9):1357-1387. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.06.006
82. Aksit A., Onar N., Kutlu B., Sergin E., Yakin I. Synergistic effect of phosphorus, nitrogen and silicon on flame retardancy properties of cotton fabric treated by sol-gel process. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2016; 28(3):319-327. DOI: 10.1108/IJCST-03-2016-0029
83. Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009; 63(3):100-125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002
84. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2013; 2(4):1-19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
85. Xinyan Huang, Rein G. Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics. *Combustion and Flame*. 2014; 161(6):1633-1644. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.12.013
86. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel.* 2009; 88(6):1024-1030. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.10.034
87. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Regulation of the physicochemical properties of compositions based on metal-ammonium phosphates, exhibiting a fire-retardant and fire-extinguishing effect. *Sviridov readings : collection of articles* / T.N. Vorob'eva (ed.). Vol. 7. Minsk, 2011; 21-27. URL: http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996 (rus).
88. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis, physicochemical and fire-retardant properties of ammonium metallophosphates. *Vestnik BGU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography.* 2009; 1:34-39. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574185 (rus).
89. Sychev M.M. The prospect of using the sol-gel method in the technology of inorganic materials. *Journal of Applied Chemistry of the USSR.* 1990; 63(3):489-499.
90. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Fire-retardant properties of metal-phosphate suspensions based on natural raw materials. *Chemical reagents, reagents and low-tonnage processes chemistry : collection of scientific papers.* Minsk, Belarusian Science Publ., 2011; 272-284. (rus).
91. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Development of synthetic compositions of complex action for fire protection and extinguishing of natural combustible materials. *Emergencies: prevention, elimination.* 2012; 1(31):53-61. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26295113 (rus).
92. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis of flame retardants for wood and peat on the basis of natural minerals and their physico-chemical properties. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. Thematic issue "Polymer materials of low flammability".* 2013; 8(145):232-236. URL: http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3617 (rus).
93. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Investigation of fire-retardant and fire-extinguishing properties of orthophosphate suspensions obtained on the basis of natural minerals. *Sviridov readings : collection of articles*. Vol. 9. Minsk, 2013; 28-36. URL: http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358 (rus).
94. Bogdanova V.V., Lakhvich V.V., Vrublevsky A.V., Dmitrichenko A.S. Fire extinguishing efficiency of liquid chemical compositions when extinguishing class A fires with spray fire extinguishing devices. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2008; 1(7):35-41. URL: https://vestnik.ucp.by/ru/archive (rus).
95. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Economical fire-retardant and fire-extinguishing suspensions based on natural metallosilicate raw materials. *Innovations in science, industry and education : collection of materials of the scientific and technical conference*. Vitebsk, 2010; 140-144. (rus).
96. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Temperature profile in model foci of peat when it is quenched with synthetic liquid compositions. *XXIV International Scientific and Practical Conference on Fire Safety Problems Dedicated to the 75th Anniversary of the Institute : Collection*. In 2nd parts. Part 2. Moscow, VNIIPO, 2012; 71-74. (rus).
97. Lyudko A.A., Bogdanova V.V., Kobets O.I. Methods for determining the spreadability of melts of fire-extinguishing chemical compositions. *Emergencies: theory, practice, innovations : materials of the international scientific-practical conference. Gomel, May 24-25, 2012*. In 2nd parts. Part 1. Gomel, GSTU im. BY. Sukhoi, 2012; 190-191. (rus).
98. Arinushkina E.V. *Manual for the chemical analysis of soils*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, MSU, 1970; 487. (rus).

99. Marczenko Z. *Kolorymetryczne oznaczanie pierwiastkow.* Warszawa, 1968; 716. (pol.).
100. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Usenya V.V., Gordey N.V., Matyukha S.L. Development and fire retardant and fire extinguishing efficiency of a new unified composition based on local raw materials for fighting fires in the forestry complex. *Proceedings of BSTU. No. 1: Forestry*. 2014; 1:55-58. URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/11427 (rus).
101. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Investigation of the physicochemical and fire-preventing properties of synthetic suspensions based on tripoli and bentonite. *Chemical reagents, reagents and processes of low-tonnage chemistry : collection of abstracts of the XXVII International scientific and technical conference.* Minsk, Belarusian Science Publ., 2013; 151-160. (rus).
102. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Kirlitsa V.P. Mechanism and synergistic action of nitrogen-phosphorus-containing fire retardants in fire protection and extinguishing of wood and peat. *Khimicheskaya fizika.* 2016; 35(4):57-63. DOI: 10.7868/S0207401X16040038 (rus).
103. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Buraya O.N. Directional regulation of the fire-protective and extinguish efficiency of N-P-containing fire retardants in synthetic and natural polymers. *Combustion and explosion.* 2019; 12(2):106-115. DOI: 10.30826/CE19120214 (rus).
104. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A., Kirlitsa V.P. Optimization of fire-retardant and fire-extinguishing properties of the composition for the prevention and localization of fires in the natural complex by the method of mathematical planning of the experiment. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2012; 1(15):32-39. URL: https://vestnik.ucp.by/ru/archive (rus).
105. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Kirlitsa V.P. Application of a full factorial experiment to determine the mechanism of the inhibitory effect of flame retardants. *Sviridov readings : collection of articles.* Vol. 10. Minsk, 2014; 23-38. URL: http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358 (rus).
106. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Weatherproof fire-retardant and fire-extinguishing composition for preventing and extinguishing fires in the natural complex. *Sviridov readings : collection of articles.* Vol. 13. Minsk, 2017; 31-40. URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/228556 (rus).
107. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Resource-saving fire-retardant and fire-extinguishing composition "complex" for preventing and extinguishing fires in the natural complex. *Alternative sources of raw materials and fuel : collection of scientific papers.* Vol. 3. Minsk, Belarusian Science Publ., 2018; 91-100. (rus).
108. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Usenya V.V., Gordey N.V., Matyukha S.L. Investigation of the physicochemical and fire-preventing properties of synthetic compounds in relation to wood and peat. *Problems of forestry and forestry : collection of scientific papers.* Vol. 746. Gomel, FI NAS Belarus, 2016; 491-501. (rus).
109. Usenya V.V., Gordey N.V., Markevich T.S., Teglenkov E.A. Silvicultural and ecological aspects of the use of the chemical composition "Kompleksil" for fighting fires in the natural complex of the Republic of Belarus. *Problems of forestry and forestry : collection of scientific papers*. Vol. 76. Gomel, FI NAS Belarus, 2016; 543-552. (rus).

Поступила 21.09.2020, после доработки 15.10.2020; принята к публикации 28.10.2020
Received September 21, 2020; Received in revised form October 15, 2020; Accepted October 28, 2020

Информация об авторах

БОГДАНОВА Валентина Владимировна, д-р хим. наук, профессор, заведующая лабораторией огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 528477; Scopus Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

КОБЕЦ Ольга Игоревна, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 1043455; ORCID: 0000-0002-6702-7430; e-mail: kobets@bsu.by

Information about the authors

Valentina V. BOGDANOVA, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Extinguishing Materials Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 528477; Scopus Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

Olga I. KOBETS, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Extinguishing Materials Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 1043455; ORCID: 0000-0002-6702-7430; e-mail: kobets@bsu.by

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.28-39
УДК 69:614.84; 691-419
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева

© А.Н. Гаращенко ✉, А.В. Виноградов, И.З. Даштиев, Н.В. Кобылков, С.А. Терехов

АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (Россия, 141371, Московская обл., г. Хотьково, ул. Заводская)

АННОТАЦИЯ

Введение. На примере рулонного базальтоволокнистого материала МБОР продемонстрированы возможности исследований конструктивной огнезащиты на стенде лучистого нагрева.

Методика исследований. Воспроизведение требуемого режима высокотемпературного воздействия производится за счет лучистого нагрева пакетом мощных галогенных ламп накаливания. Режим регулируется изменением напряжения, подаваемого на лампы, и контролируется с помощью термопар, фиксирующих температуру нагреваемой поверхности образца огнезащиты. Подобные исследования показали свою эффективность для различных видов огнезащиты и различных конструкций. Особенно они актуальны при обеспечении рациональной огнезащиты конструкций из полимерных композитов, имеющих относительно низкую термостойкость (80...120 °С), поскольку испытания в огневых печах для них практически не проводились.

Результаты и обсуждение. Проведены испытания нескольких вариантов многослойной огнезащиты на основе материала МБОР-20Ф. Представлены зависимости от времени температуры поверхности защищаемого элемента (пластины из полиуретана размерами 200 × 300 × 20 мм), а также на границе между слоями материала МБОР при воспроизведении стандартного температурного режима. Продемонстрировано, насколько возрастает огнезащитная эффективность при наличии между слоями МБОР огнезащитного клеевого состава ПЛАЗАС. Показано, что такая конструктивная огнезащита применима не только для конструкций из металла. Она позволяет обеспечить высокие показатели огнестойкости и перспективна для защиты конструкций и изделий из полимерных композитов. Результаты термопарных измерений при испытаниях по предлагаемой методике могут быть использованы для оценки величин теплофизических характеристик огнезащитных материалов при высоких температурах, которые в большинстве случаев отсутствуют, но необходимы для проведения теплотехнических расчетов. Продемонстрировано, что подобные эксперименты могут проводиться и при температурных режимах нагрева, отличающихся от стандартного (например, при воспроизведении режима горения углеводородного горючего).

Выводы. Эксперименты на стенде лучистого нагрева в сочетании с теплотехническими расчетами позволяют ускорить выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и в то же время дают возможность сократить до разумного минимума количество дорогостоящих испытаний натурных образцов различных конструкций и изделий с огнезащитой в огневых печах.

Ключевые слова: галогенные лампы; огнезащитный клеевой состав; стандартный температурный режим; огнестойкость; теплофизические характеристики; теплотехнические расчеты

Для цитирования: *Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даштиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А.* Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 28–39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.28-39

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

Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material

© Anatoliy N. Garashchenko ✉, Aleksandr V. Vinogradov, Idris Z. Dashtiev, Nikita V. Kobylkov, Sergey A. Terekhov

Central Research Institute for Special Machinery (Zavodskaya St., Khotkovo, Moscow Region, 141371)

ABSTRACT

Introduction. Coiled MBOR basalt fiber material is used to demonstrate the potential of research into the fire protection of structures using a radiant heat test facility.

Research methods. A set of high-power halogen lamps is used to simulate a high temperature impact. The heating intensity is adjusted by changing the voltage applied to the lamps, and it is controlled by the thermocouples that record the temperature of the heated surface of a fire proofing material. The studies have proven efficient for various types of fire proofing and various structures. They are especially relevant in providing rational fire protection of polymer composite structures having relatively low thermal resistance (80...120 °C) due to the fact that they are rarely tested in fired furnaces.

Results and discussion. Several options of multilayered MBOR-20F fire proofing were tested. Dependences between time, on the one hand, the surface temperature of protected elements (200 × 300 × 20 mm polyurethane plates), and the temperature between the layers of the fire-proofing material, on the other hand, are presented under standard temperature conditions. Fire protection efficiency improvement by PLAZAS fire-resistant adhesive compound, applied between MBOR layers, is demonstrated. This fireproofing method is applicable not only to metal structures. It demonstrates high fireproofing properties and has a strong potential if applied to fireproof polymer composite structures and products. The measurements, taken by thermocouples in the course of a session of tests, can be used to estimate the thermophysical properties of fireproofing materials exposed to high temperatures, which are rare in most cases, although they are necessary for a thermal analysis. It is demonstrated that similar experiments can also be carried out at nonstandard heating temperatures (for example, when the combustion of fossil fuels is imitated).

Conclusions. Experiments, conducted using the radiant heat test facility, and thermal engineering calculations allow to accelerate the selection of the optimal fire protection option and identification of the fireproofing thickness. Moreover, this method allows to reasonably minimize the number of costly fired furnace tests using full-scale samples of fireproofed structures and products.

Keywords: halogen lamps; fire-resistant adhesive compound; standard temperature mode; fire resistance; thermal and physical characteristics; thermal and physical analyses

For citation: Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Dashtiev I.Z., Kobylkov N.V., Terekhov S.A. Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):28-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.28-39 (rus).

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

Введение

Одним из эффективных средств огнезащиты, обеспечивающих достижение высоких пределов огнестойкости различных конструкций, является конструктивная огнезащита на основе термостойких плит, матов, рулонных материалов. Испытания конструкций с огнезащитой в огневых печах аккредитованных испытательных центров стандартизованы, однако, требуются значительные затраты средств и времени на их проведение. В то же время важная информация по огнезащитной эффективности применяемых материалов может быть получена в ходе предварительных исследований на лабораторно-стендовом оборудовании.

Такие исследования особенно актуальны при осуществлении рациональной огнезащиты конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов, имеющих относительно низкую термостойкость (в большинстве случаев на уровне 80…120 °С). Обеспечение требуемых показателей их пожаробезопасности представляет собой сложную задачу. Основные проблемы и особенности создания пожаробезопасных конструкций с несущими элементами из полимерных композитов рассмотрены в [1, 2]. Важнейшим показателем их пожарной опасности является предел огнестойкости и обеспечение требуемого его уровня, что в большинстве случаев возможно только за счет применения конструктивной огнезащиты значительной толщины. В то же время испытания в огневых печах аккредитованных испытательных центров для таких конструкций, практически, не проводились.

Перед авторами статьи стояла задача по проектированию в кратчайшие сроки оптимальной огнезащиты конструкции с несущим элементом из полиуретана, являющегося одним из видов полимерных композитов. Рассматривались варианты обеспечения пределов огнестойкости 60 мин и 90 мин при огневом воздействии на такую конструкцию по стандартному температурному режиму. Признано необходимым проведение (на начальном этапе проектирования огнезащиты) испытаний образцов на лабораторно-стендовом оборудовании при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия при пожаре, а в последующем — выполнение теплотехнических расчетов конструкции с огнезащитой с учетом результатов этих испытаний. Такой подход, как отмечено в [1, 2], ускоряет выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и в то же время позволяет сократить до минимума количество дорогостоящих огневых испытаний натурных образцов с огнезащитой, необходимых для подтверждения правильности принятых проектных и технологических решений. Можно отметить, что реализация подобного подхода, безусловно, актуальна также для обеспечения огнезащиты конструкций из других материалов (метала, железобетона, древесины).

В ходе проектирования рассматриваемой конструкции из полимерного композита был проведен анализ современных средств защиты от пожара с учетом показателей огнезащитной эффективности и стоимости материалов огнезащиты, а также особенностей ее нанесения (монтажа). Анализ показал целесообразность использования в данном случае конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала марки МБОР-20Ф толщиной 20 мм, имеющего слой алюминиевой фольги на поверхности. Известно, что материал МБОР различной толщины успешно используется совместно с клеевым огнезащитным составом ПЛАЗАС в составе конструктивной огнезащиты несущих конструкций из металла, воздуховодов и т.д. Как правило, используется один слой (в отдельных случаях — два слоя) МБОР толщиной от 8 до 20 мм и слой ПЛАЗАС толщиной от 1,5 до 3,7 мм.

В данной статье обоснован выбор и представлены результаты испытаний образцов огнезащиты на лабораторно-стендовом оборудовании, которые явились важным этапом работ по обеспечению заданных показателей пожаробезопасности рассматриваемой конструкции из полимерных композитов.

Методика исследований

В нашей стране и за рубежом опубликовано значительное количество работ, посвященных методам и результатам исследований образцов различных средств огнезащиты на лабораторно-стендовом оборудовании. Их анализ свидетельствует, что за рубежом методики таких испытаний во многих случаях стандартизованы. Для отечественной практики более характерно использование нестандартизованных методик для решения исследователями конкретных задач. Применяемые методики отличаются по способам воспроизведения и контроля условий высокотемпературного воздействия на образцы, по размерам исследуемых образцов и т.д. В большинстве случаев высокотемпературное воздействие обеспечивается за счет электрических нагревателей или горелок.

Широкое распространение получили испытания с использованием горелок (керосиновых или газовых). Они описываются в работах [3–10] и стандарте ISO 2685:1998 (E)[1]. Результаты оценки огнезащитной эффективности различных рецептур вспучивающихся покрытий при использовании газовых горелок представлены, например, в [3–5]. Особенностью таких испытаний является относительно небольшая зона огневого воздействия на образец и неравномерность теплового потока даже в пределах этой зоны. Соответственно, предусматривалось использование относительно небольших образцов.

Методики, предусматривающие использование керосиновых и газовых горелок, получили наибольшее распространение при огневых испытаниях материалов и конструктивных элементов авиационного назначения, что нашло отражение в стандарте ISO 2685:1998 (E), справочниках, отчетах и публикациях [6–11]. С помощью таких испытаний за рубежом и в нашей стране оценивается и обеспечивается выполнение требования по огнестойкости и огненепроницаемости. В авиационной отрасли огненепроницаемым материалом или компонентом является материал или компонент, способный выдерживать пламя температурой 1100 ± 80 °С как минимум в течение 15 мин при выполнении своих функций, а огнестойким — материал или компонент, способный выдерживать пламя температурой 1100 ± 80 °С как минимум в течение 5 мин. Кроме использования обычных горелок, способных обеспечить воздействие пламени на относительно небольшом участке образца, практикуется применение специальной многорожковой газовой горелки с диаметром факела 120, 152 и даже 180 мм [7–11]. Однако даже при таком увеличении рабочей зоны огневого воздействия на образец вызывает сомнения возможность проведения испытаний конструктивной огнезащиты при времени воздействия более 15 мин, предусмотренном в авиационной отрасли.

Существуют также методики, предусматривающие использование трубчатых электрических нагревателей. Однако, как правило, и в этом случае размеры исследуемых образцов ограничены. Испытываются, например, вспучивающиеся покрытия, нанесенные на стальные пластины размером 140 × 80 мм [12] или диаметром около 100 мм [13]. Возможности для исследований различных средств огнезащиты подобным методом ограничены рядом причин, в числе которых сложность воспроизведения заданного режима высокотемпературного воздействия и обеспечения равномерного нагрева образцов.

Гораздо большие возможности у методик, предусматривающих использование в качестве источника нагрева мощных галогенных ламп накаливания. Стенды лучистого нагрева первоначально создавались и используются до настоящего времени для испытаний материалов и элементов ракетно-космической техники [14]. Продемонстрировали они свою эффективность и при исследованиях огнезащиты в основном тонкослойных вспучивающихся покрытий [15–18].

В целом следует отметить, что наибольший опыт и возможности по исследованиям различных средств огнезащиты на различных вариантах стенда

[1] ISO 2685:1998 (E). Aircraft — Environmental test procedure for airborne equipment — Resistance to fire in designated fire zones. Second edition // International Organization for Standardization, Genev, Switzeland, 1998. 31 p.

лучистого нагрева имеются в АО «ЦНИИСМ», что отражено в публикациях [15, 18–20]. Имеющийся в организации стенд лучистого нагрева в настоящее время приспособлен для исследований образцов конструктивной огнезащиты. Обеспечена возможность проведения испытаний при относительно большом времени высокотемпературного воздействия на образцы, имеющие достаточно большие размеры. В связи с этим на данном стенде была запланирована и проведена серия испытаний образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала марки МБОР, предназначенного для защиты от пожара конструкции из полиуретана.

Исследования проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 1.

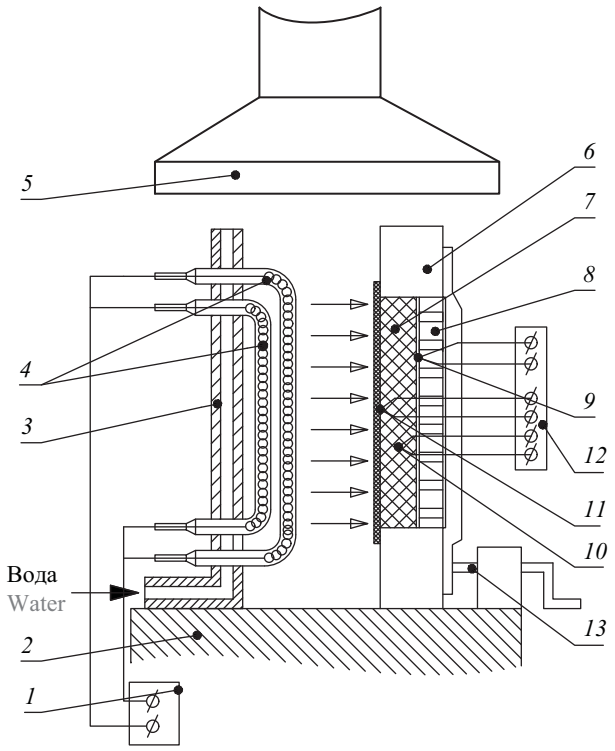


Рис. 1. Схема стенда лучистого нагрева: *1* — пульт управления нагревом; *2* — стол; *3* — водоохлаждаемый экран; *4* — галогенные лампы; *5* — вентиляционный кожух; *6* — огнестойкая панель, в которой устанавливается исследуемый образец; *7* — образец огнезащиты; *8* — подложка из полиуретана; *9* — термопара на границе огнезащита-подложка; *10*, *11* — термопары, расположенные на обогреваемой поверхности и распределенные по толщине огнезащиты; *12* — система регистрации температуры; *13* — устройство для перемещения образца

Fig. 1. The diagram of a radiant heat test facility: *1* — heating control panel; *2* — table; *3* — water-cooled screen; *4* — halogen lamps; *5* — fan covering; *6* — fire resistant panel accommodating the sample; *7* — fire proofing sample; *8* — polyurethane base; *9* — thermocouple between the fireproofing and the base; *10*, *11* — thermocouples on the heated surface and distributed inside the fireproofing; *12* — temperature monitoring system; *13* — sample mover

Нагреватель представляет собой пакет галогенных ламп КГ220-2500, расположенных в два ряда и охватывающих площадь 400 × 400 мм. Мощность одной лампы — 2500 Вт (всего в пакете 63 лампы). Таким образом, общая мощность нагревателя 157,5 кВт. Лампы установлены в специальные штекеры, объединенные в шины, которые кабелями подключены к системе управления нагревом. Отражающий экран нагревателя, за которым расположены штекеры, охлаждается водой, что позволяет увеличить длительность эксперимента. Нагреватель установлен на специальной стойке, позволяющей регулировать пространственное расположение образца относительно пакета ламп.

Управление нагревом ведется с помощью шкафа управления следующим образом. В начальный момент нагреватель включается по трем фазам на напряжение 220 В по схеме «звезда» и происходит разогрев системы. После того как пусковые токи снизятся до номинального уровня (это время задается программируемым таймером и составляет 0,2…0,3 с), происходит автоматическое переключение ламп на схему «треугольник» под напряжение 380 В. Таким образом, удается избежать значительных пусковых токов в процессе форсажного включения нагревателя. Достигаются следующие значения плотности теплового потока, подающего на нагреваемую поверхность: 450 кВт/м² при напряжении 220 В и 1350 кВт/м² при напряжении 380 В. Возможна установка датчика теплового потока, представляющего собой медную пластину толщиной 2,5…3 мм с зачеканенными с тыльной стороны термопарами.

Образец размещается в проеме плоской вертикальной панели из огнезащитной плиты Promatect L-500 толщиной 60 мм, обладающей высокой термостойкостью и относительно низкой теплопроводностью. Наружная поверхность образца перекрывается пластиной из высокотеплопроводного углерод-углеродного материала толщиной 0,5 мм. Под ней размещаются термопары, которые фиксируют температуру нагреваемой поверхности образца и вместе с этим служат для регулирования режима высокотемпературного воздействия от пакета ламп накаливания.

Объектом исследований являлись плоские образцы конструктивной огнезащиты размером 200 × 300 мм различной толщины из слоев базальтоволокнистого материала марки МБОР-20Ф толщиной 20 мм (при отсутствии и наличии между ними слоев клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС). Защищаемый элемент — пластина из полиуретана марки СКУ-ПФЛ-100 толщиной 20 мм, имеющая такие же размеры. Было известно, что ввиду использования влагосодержащего клеевого слоя, тем-

пература поверхности защищаемых конструкций из стали через определенный промежуток времени достигает значения 100 °С и может оставаться на этом уровне, подчас, значительное время. Применительно к конструкциям из полимерных композитов, имеющих низкую термостойкость, представляет несомненный интерес оценка влияния слоев такого состава на эффективность огнезащиты.

Уровень прогрева образцов в ходе каждого испытания фиксировался с помощью термопар, установленных на границе огнезащита-подложка, а также между каждым слоем МБОР-20Ф. Общий вид стенда в процессе испытания показан на рис. 2. Видна углерод-углеродная пластина, под которой размещаются термопары, регистрирующие температуру поверхности образца и обеспечивающие управление режимом нагрева. В зоне ненагреваемой поверхности полиуретановой пластины размещался слой минераловатной теплоизоляции толщиной порядка 25 мм.

Режим нагрева при испытаниях регулировался за счет изменения мощности нагревателя и задавался таким, чтобы температура нагреваемой поверхности приблизительно соответствовала или была несколько ниже, чем температура газовой среды при стандартном температурном режиме пожара. Расчетные оценки показали, что для огнезащитных материалов с низкой теплопроводностью, к которым относится МБОР, температура нагреваемой поверхности приближается к температуре газовой среды. Поэтому реализуемый при испытаниях режим нагрева позволяет достаточно близко воспроизводить высокотемпературное воздействие при стандартном температурном режиме. В то же время результаты измерений температуры нагреваемой поверхности при испытаниях являются важной информацией для последующего теплотехнического анализа. Изменение температуры газовой среды при стандартном режиме описывается зависимостью (1):

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

где T — температура газовой среды, соответствующая времени t, °С;

T_o — температура до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Всего было проведено девять испытаний образцов с различными вариантами конструктивного исполнения и толщиной огнезащиты на основе материала МБОР-20Ф. Поверхности с фольгой при испытаниях ориентировались в сторону нагрева. Перед каждым из испытаний проводилась оценка толщины слоев огнезащиты. Продолжительность испытания задавалась такой, чтобы температура поверхности подложки из полиуретана достигала уровня 140…180 °С. После выключения нагревателя запись изменения температуры производилась еще некоторое время.

В четырех случаях (опыты № 1–4) испытывались образцы с огнезащитой из одного, двух и трех слоев МБОР-20Ф без использования клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС. В опыте № 5 использовалось два слоя МБОР-20Ф, на каждый из которых (на фольгу) наносился слой состава ПЛАЗАС толщиной порядка 0,7 мм. После отверждения клея на каждом из слоев МБОР они соединялись в единый образец. При этом было установлено, что после отверждения каждый из слоев оказался деформирован.

При изготовлении образцов для последующих испытаний два или три слоя МБОР-20Ф склеивались составом ПЛАЗАС толщиной 0,5…0,7 мм. После его отверждения деформация образцов огне-

Рис. 2. Общий вид стенда лучистого нагрева во время испытания
Fig. 2. A radiant heat test facility in the process of testing

защиты не наблюдалась (опыты № 6–9). На наружную поверхность (на слой фольги) одного из образцов огнезащиты (опыт № 8) был нанесен слой огнезащитного вспучивающегося покрытия СГК-2 толщиной порядка 0,7 мм. В опыте № 9 использовался образец огнезащиты с наружным слоем из термостойкой кремнеземной ткани КТ-11, на поверхность которой был нанесен слой покрытия СГК-2 толщиной порядка 0,6 мм.

В последних двух случаях пластина углерод-углеродного материала не использовалась. В этих двух опытах предпринималась попытка регистрации температуры наружной поверхности вспучивающегося покрытия с помощью термопары (и регулирования по ее показаниям режима нагрева). В опыте № 8 регистрировалось также изменение температуры под наружным слоем фольги, а в опыте № 9 — под слоем ткани КТ-11. В ходе этих двух экспериментов выполнялось визуальное наблюдение за поверхностью образцов. После испытаний и охлаждения образцов проводился их визуальный осмотр и фиксировалось состояние огнезащиты.

Результаты и обсуждение

В ходе анализа состояния образцов после проведения экспериментов было установлено, что при высокотемпературном нагреве происходит уменьшение толщины (усадка, спекание) МБОР-20Ф (на 25…30 % и более для наиболее прогретого слоя). МБОР после высокотемпературного воздействия стал хрупким, но плавление базальтового волокна не зафиксировано. На нагреваемой поверхности образцов огнезащиты сохранялись только отдельные участки фольги.

Визуальные наблюдения за нагреваемой поверхностью образцов показали, что в опыте № 8 наблюдалось вспучивание покрытия СГК-2. Толщина вспученного слоя составила порядка 17…22 мм с последующим его уменьшением до толщины 8…12 мм в конце эксперимента. В опыте № 9 после образования вспученного слоя толщиной 15…20 мм наблюдалось его постепенное отслоение и обрушение с отдельных участков наружного слоя ткани КТ-11.

Результаты испытаний представлены в таблице и на рис. 3–5. В таблице указана структура образцов и приведен важнейший для защищаемых композитных конструкций (в данном случае из полиуретана) показатель — время достижения температурой на границе огнезащита-подложка уровня 100 °С. На рис. 3 представлены результаты термопарных измерений в ходе первых четырех испытаний, проведенных для образцов из МБОР-20Ф без клеевого состава, а остальные — в ходе испытаний № 6, 7, 9 при наличии слоев клеевого состава (рис. 4, 5).

Анализ результатов испытаний, представленных в таблице и на рис. 3–5, показал, что конструктивная огнезащита, предусматривающая использование промежуточных слоев из состава ПЛАЗАС, обеспечивает более высокий уровень огнезащитной эффективности по сравнению с вариантом многослойной конструкции только из МБОР-20Ф.

Вид кривых на рис. 4, 5 можно объяснить процессами диффузии, конденсации и последующего кипения (испарения) пара, образовавшегося при нагреве клеевого материала [21]. Реализуется так называемая полка или плато, что показали ранее полученные результаты многочисленных испытаний (в том числе сертификационных) конструкций с подобной огнезащитой. Такой вариант обеспечивает относительно низкую толщину огнезащиты металлоконструкций, для которых критическая температура имеет уровень 500 °С. Применительно к конструкциям из полимерных композитов, имеющих значительно меньшую термостойкость, представляет несомненный интерес оценка влия-

Время достижения температурой уровня 100 °С на границе огнезащита-подложка из полиуретана
Time to 100 °C at the boundary between the fireproofing and the polyurethane base

Номер испытания Test no.	1	2	3	4	5*	6	7	8**	9***
Кол-во слоев МБОР-20Ф Number of MBOR-20F layers	1	2	2	3	2	3	3	3	3
Наличие слоев ПЛАЗАС Use of PLAZAS layers	—	—	—	—	2*	2	2	2	2
$t_{100\ °C}$, мин / $t_{100\ °C}$, min	9,4	17,4	20,3	33,2	25,0	66,5	68,5	52,1	55,4

*Состав ПЛАЗАС на поверхностях первого и второго слоя МБОР-20Ф.
**Покрытие СГК-2 на поверхности первого слоя МБОР-20Ф.
***Ткань КТ-11 с покрытием СГК-2 на нагреваемой поверхности огнезащиты.
*PLAZAS compound on the surface of the first and second MBOR-20F layers.
**SGK-2 coating on the surface of the first MBOR-20F layer.
***KT-11 fabric w/SGK-2 coating on the heated fireproofing surface.

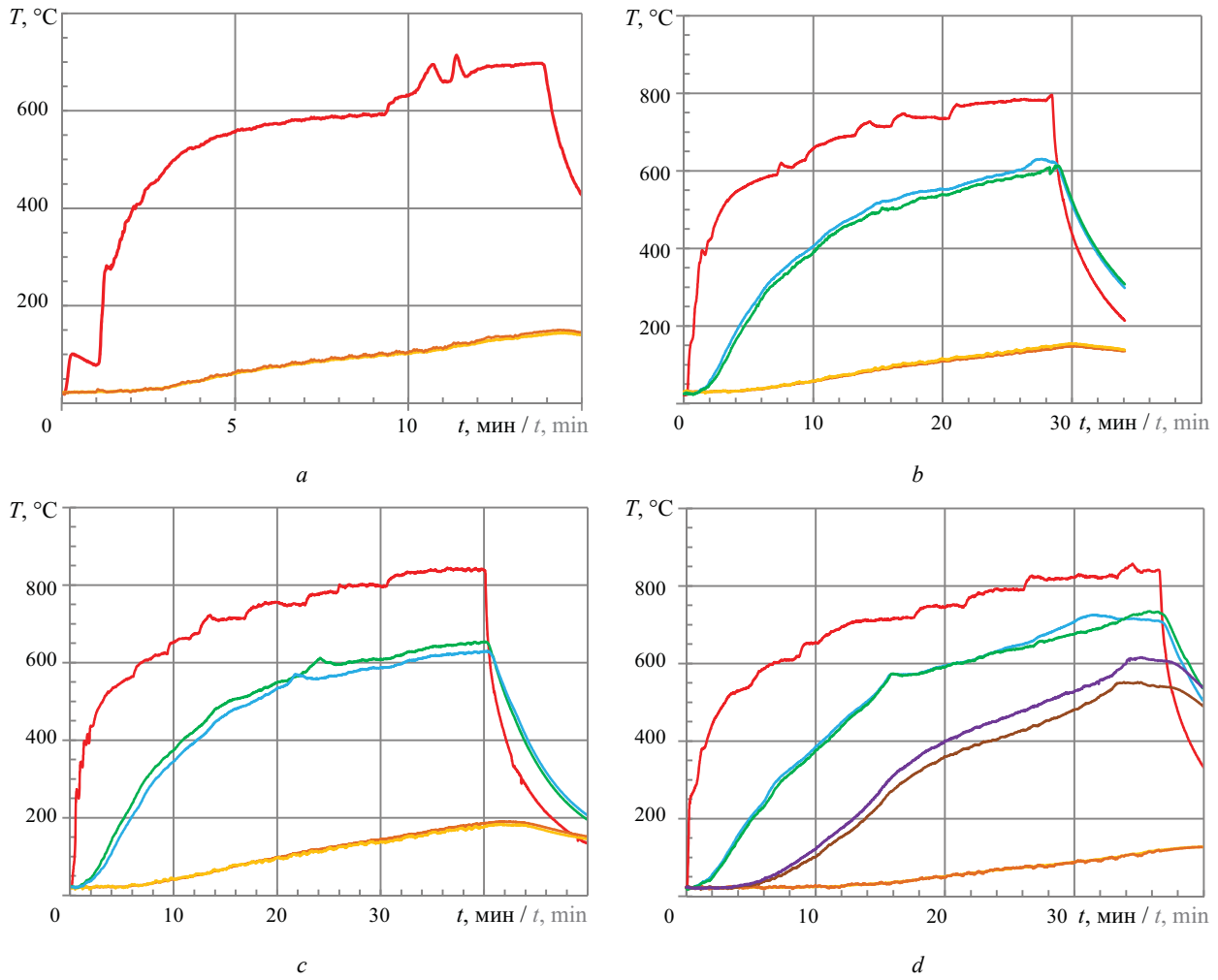


Рис. 3. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из полиуретана (—, —) для образцов, состоящих из одного слоя МБОР-20Ф (*a*), двух слоев МБОР-20Ф (*b*, *c*), трех слоев МБОР-20Ф (*d*), а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф (испытания № 1–4)

Fig. 3. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—) and the polyurethane plate (—, —) over time for the samples that have one MBOR-20F layer (*a*), two MBOR-20F layers (*b*, *c*), three MBOR-20F layers (*d*), as well as the temperature at the boundaries between the first and the second (—, —) layer and the second and the third (—, —) layer of MBOR-20F (tests 1-4)

ния такого состава, поскольку он способен повысить эффективность конструктивной огнезащиты. В данном случае установлено, что даже наличие прослоек из ПЛАЗАС относительно небольшой толщины обеспечило появление таких полок, что привело к существенному снижению уровня нагрева защищаемой пластины из полиуретана. Это видно на рис. 4, 5. Эксперименты показали, что при использовании трех слоев МБОР-20Ф, склеенных слоями ПЛАЗАС, можно обеспечить значения показателя огнестойкости конструкций из полимерных композитов на уровне 60 мин.

Существенно худший результат получен для составного образца из двух слоев МБОР-20Ф с составом ПЛАЗАС, который наносился на фольгу каждого из слоев и предварительно отверждался (испытание № 5). Не выявлено значимого эффекта от использования тонкого слоя покрытия СГК-2 на поверхности огнезащиты. Однако это может быть связано с тем, что при образовании и росте толщины вспученного слоя измерение температуры нагреваемой поверхности с помощью термопар затрудняется и, возможно, был реализован более жесткий режим нагрева по сравнению с испытаниями, когда термопары достаточно точно и стабильно фиксировали температуру поверхности огнезащиты, находясь под пластиной из углерод-углеродного материала.

Относительно возможности достижения показателя огнестойкости композитной конструкции на уровне 90 мин можно отметить следующее. Испытания на используемом стенде лучистого нагрева при указанном выше размере в плане образцов не предполагают возможность увеличения их тол-

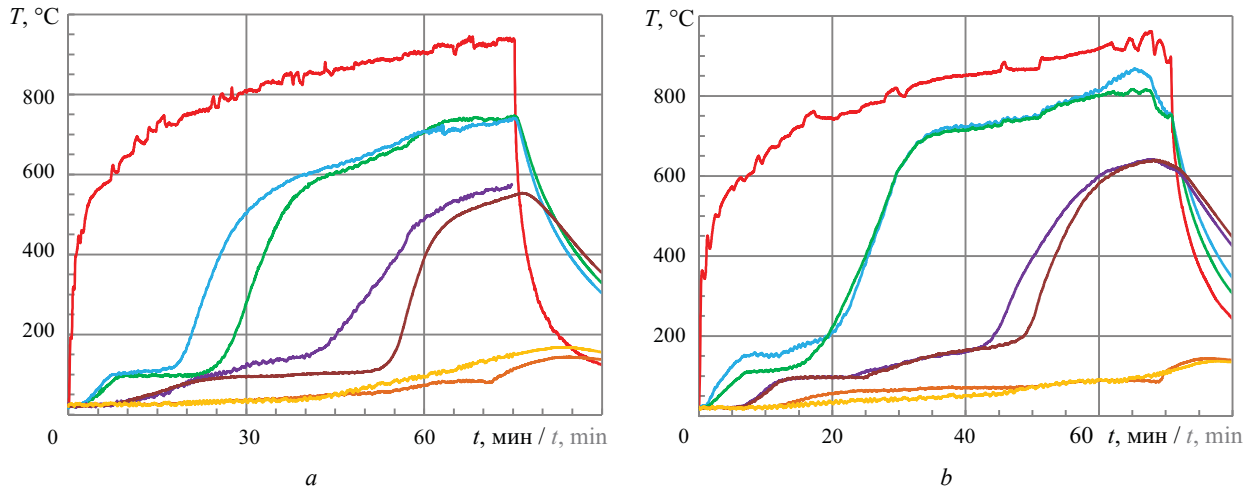


Рис. 4. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из полиуретана (—, —) для образцов, состоящих из трех слоев МБОР-20Ф со слоями ПЛАЗАС между ними, а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои огнезащиты в испытаниях № 6 (*a*) и № 7 (*b*)

Fig. 4. The change in the temperature of the surface of the heated fireproofing material (—) and the polyurethane plate (—, —) over time for the samples that have three MBOR-20F layers w/ PLAZAS layers between them, as well as the temperature at the boundaries between the first and the second (—, —) layer, as well as the second and the third (—, —) fire proofing layer in tests 6 (*a*) and 7 (*b*)

щины до 80 мм (четыре слоя МБОР-20Ф) и более из-за возрастающей при этом роли так называемого краевого эффекта. Однако экстраполяция полученных результатов экспериментальных исследований позволяет дать прогноз по уровню толщины конструкционной огнезащиты на основе МБОР-20Ф с промежуточными слоями из клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС, необходимыми для обеспечения показателя огнестойкости 90 мин для конструкций из полимерных композитов. В первом приближении оценка ожидаемой суммарной толщины огнезащиты дает уровень 100…140 мм.

Для более точного определения толщин огнезащиты для конкретных конструкций должны проводиться теплотехнические расчеты с учетом результатов испытаний на стенде лучистого нагрева. Это и предполагалось провести на следующем этапе работ по обеспечению требуемой огнестойкости упоминаемой конструкции из полиуретана.

Важным моментом является то, что анализ и обработка результатов термопарных измерений, представленных в статье, позволяет уточнить значения неизвестных на данный момент значений теплофизических характеристик огнезащитных материалов (в данном случае МБОР) при высоких температурах, от которых зависят в значительной степени результаты теплотехнических расчетов.

Кроме того, испытания на стенде лучистого нагрева позволяют решать и другие задачи. Например, оценивать стойкость различных материалов в условиях заданного режима высокотемпературного воздействия (наличие усадки, растрескивания плавления и пр.), а также проводить сравнительную оценку термостойкости и огнезащитной эффективности различных материалов. Для иллюстрации проведен эксперимент, в ходе которого оценивалось влияние слоев фольги на уровень прогрева пластины из полиуретана с огнезащитой из слоев материала МБОР толщиной 8…10 мм (без использования клеевого состава). Результаты термопарных

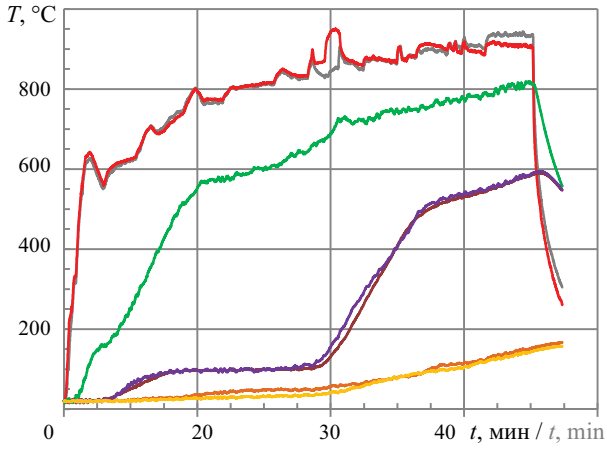


Рис. 5. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—, —) с наружным слоем ткани КТ-11 с покрытием СГК-2 и пластины из полиуретана (—, —) для образца, состоящего из трех слоев МБОР-20Ф со слоями состава ПЛАЗАС между ними, а также температуры на границе первый-второй (—) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф в испытании № 9

Fig. 5. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—, —) w/ an outer layer of KT-11 fabric treated with SGK-2 coating and the polyurethane plate (—, —) for the sample that has three MBOR-20F layers w/ PLAZAS compound layers between them, as well as in the temperature at the boundaries between the first and the second (—) layer, the second and the third layer of MBOR-20F (—, —) in test 9

измерений в ходе этого испытания, представленные на рис. 6, показали, что уровень прогрева пластины из полиуретана несущественно отличался для обеих частей составного образца (наличие фольги приблизительно на 10 °С снизило уровень прогрева пластины из полиуретана за время воздействия порядка 43 мин по стандартному режиму). Важным результатом этого эксперимента было то, что он продемонстрировал возможность значительного увеличения лучистого теплового потока и температуры нагреваемой поверхности образца на этом стенде до уровня 1100 °С и более (см. рис. 6).

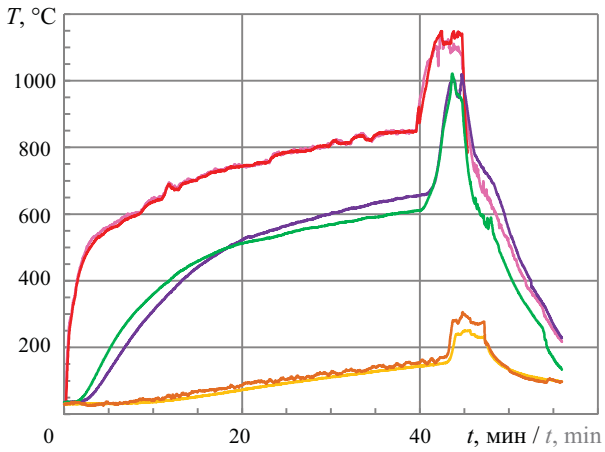


Рис. 6. Изменение со временем температуры нагреваемой поверхности огнезащиты (—, —) и пластины из полиуретана, (—, —), а также температуры на границе третий-четвертый слои составного образца, состоящего из шести слоев материала МБОР толщиной 8…10 мм с фольгой (—) и без фольги (—), соответственно

Fig. 6. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—, —) and the polyurethane plate, (—, —), as well as in the temperature at the boundary between the third and the fourth layer of the composite sample that has six 8-10 mm thick MBOR material layers w/ foil (—) and w/o foil (—) (respectively) over time

Естественно, испытания на стенде лучистого нагрева позволяют оценивать уровень прогрева металлических пластин с огнезащитой. В качестве примера на рис. 7 представлены показания термопар, размещенных на пластине из алюминиевого сплава и между сжатыми в 1,8 раза слоями огнезащиты из трех слоев материала МБОР-20Ф. Необходимость подобных экспериментов обусловлена тем, что огнезащита из рулонных материалов или матов при их обустройстве на реальных конструкциях может иметь различную плотность за счет сжатия.

Можно отметить, что эксперименты по предлагаемой методике являются не только важным этапом выбора рациональной огнезащиты для конкретных конструкций (в данном случае из полиуретана). Результаты термопарных измерений по толщине образцов становятся источником важной информации для

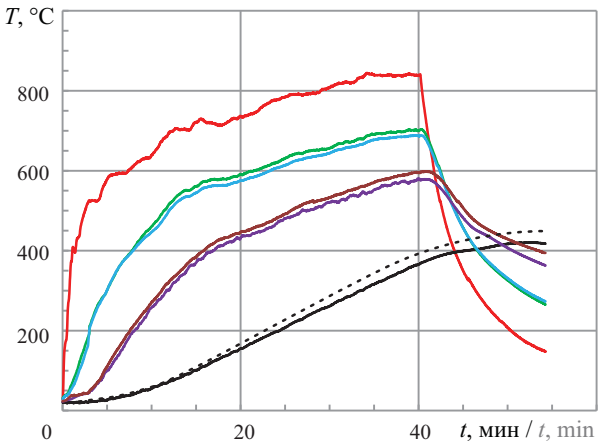


Рис. 7. Изменение со временем температуры нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из алюминиевого сплава (—, - - -) для образцов, состоящих из трех слоев МБОР-20Ф, сжатых в 1,8 раза, а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф

Fig. 7. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—) and the aluminum alloy plate (—, - - -) for samples that have three MBOR-20F layers compressed by a factor of 1.8, as well as in the temperature at the boundary between the first and the second (—, —) layers as well as the second and third (—, —) layers of MBOR-20F over time

уточнения теплофизических характеристик огнезащиты. Это расширяет возможности и повышает точность теплотехнических расчетов, с помощью которых можно, в частности, учесть влияние конфигурации защищаемых конструкций и изделий. Для проектирования огнезащиты из рулонных материалов типа МБОР это весьма актуально, учитывая возможность защиты с их помощью от пожара, например, конструкций цилиндрической формы.

Выводы

Продемонстрированы возможности оценки эффективности средств огнезащиты на стенде лучистого нагрева на примере испытаний образцов конструктивной огнезащиты на основе базальтоволокнистого материала МБОР-20Ф при воспроизведении заданных условий огневого воздействия. Представлены результаты серии экспериментов при использовании различных вариантов огнезащиты конструкции из полимерного композита (полиуретана) при стандартном температурном режиме воздействия.

Продемонстрирован существенно больший уровень огнезащитной эффективности при наличии клеевого состава ПЛАЗАС между слоями МБОР-20Ф. Такая огнезащита перспективна, например, для обеспечения показателя огнестойкости 60, 90 мин и более для конструкций и изделий из полимерных композитов, отличающихся низкой термостойкостью.

Результаты термопарных измерений при испытаниях могут быть использованы для оценки величин теплофизических характеристик огнезащитных материалов при высоких температурах, необходимых для проведения теплотехнических расчетов. Испытания на стенде возможны при температурных режимах нагрева, отличающихся от стандартного (например, при воспроизведении режима горения углеводородного горючего).

Эксперименты на стенде лучистого нагрева позволяют ускорить выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и сократить до разумного минимума количество дорогостоящих огневых испытаний натурных образцов с огнезащитой, необходимых для подтверждения правильности принятых проектных и технологических решений по огнезащите различных конструкций и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А., Даштиев И.З.* Особенности создания конструкций из полимерных композитов при наличии требований по показателям их пожаробезопасности // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2018. Вып. 2 (189). С. 62–69.
2. *Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А.* Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30
3. *Evtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Rudakova T.A., Ozerin A.N.* Effect of aluminum hydroxide on the fireproofing properties of ammonium polyphosphate-pentaerythritol-based intumescent coating // Journal of Coatings Technology and Research. 2019. Vol. 16. No. 5. 1389–1398. DOI: 10.1007/s11998-019-00221-6
4. *Григорьев Ю.А., Евтушенко Ю.М., Кучкина И.О., Рудакова Т.А.* Тенденции развития и методы испытаний огнезащитных покрытий // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 5. С. 39–44. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-5-39-44
5. *Андрюшкин А.Ю., Цой А.А.* О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 2. С. 45–53. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V82/7.pdf
6. *Tambe S., Kao Y.-H., Jeng S.-M.* Development of next generation burner characteristics for fire testing of power plant materials and components. DOT/FAA/TC-13/38, Report FAA DoT USA. 2015. 52 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-13-38.pdf
7. *Marker T.R.* Aircraft materials fire test handbook, Revision 3 // DOT/FAA/TC-17/55, Federal Aviation Administration, Atlantic Citi, USA, 2019. 573 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC17-55.pdf
8. *Le Neve S.* Fire behaviour of structural composite materials // The 6th Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, Atlantic City, USA, 2010. 48 p.
9. *Laborie D.* Fire test burner evaluation // International Aircraft Systems Fire Protection Working Group Meeting Atlantic City, New Jersey, USA, 2015, 8 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/systems/ Oct15Meeting/Laborie-1015-FireTestBurnerEvaluation.pdf
10. *Барботько С.Л., Кириенко О.А., Вольный О.С., Луценко А.Н.* Анализ пожарной опасности мотогондол авиационных двигателей и других пожароопасных зон; используемые методы огневых испытаний материалов и конструктивных элементов на соответствие требованиям авиационных норм // Проблемы безопасности полетов. 2017. № 5. С. 3–24.
11. *Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н.* Оценка пожаробезопасности материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М. : Изд-во ВИАМ, 2018. 424 с.
12. *Баженов С.В., Наумов Ю.В.* Прогнозирование динамики нагрева металлических конструкций с огнезащитной обработкой по результатам определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий (лабораторный метод) // Пожарная безопасность. 2005. № 1. С. 50–54.
13. *Рыбка Е.А., Андронов В.А.* Лабораторная установка для оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учетом параметров развития реального пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 10. С. 19–24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902909
14. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.

15. *Гаращенко А.Н., Страхов В.Л., Рудзинский В.П., Рыжков А.А.* Апробирование методики расчетов вспучивающейся огнезащиты строительных конструкций на примере покрытия Хенсотерм 4КС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1999. Т. 8. № 5. С. 29–37.
16. *Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F.* Heat and fire protection of multilayer structures based on the use of foaming coatings // Heat Transfer Research. 2005. Vol. 36. Issue 7. Pp. 543–556. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i7.20
17. *Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F.* Thermal protection of multilayer containers against the effect of fires // High Temperature. 2008. Vol. 46. Issue 2. Pp. 254–260. DOI: 10.1134/s10740-008-2015-9
18. *Корольченко А.Я., Гаращенко А.Н., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П.* Расчеты толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 3. С. 49–56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629
19. *Виноградов А.В., Кульков А.А., Пашутов А.В.* О возможностях исследования характеристик и моделирования натурных тепловых нагружений на образцы и узлы конструкций из композиционных материалов в условиях лабораторной экспериментальной базы ОАО ЦНИИСМ // Труды МИТ : научно-технический сборник. 2014. Т. 14. Ч. 1. С. 136–144.
20. *Курмашова И.А., Виноградов А.В., Соловьева Е.А.* Исследование материалов для теплоизолирующих костюмов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2014. Вып. 1 (174). С. 32–36.
21. *Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P.* High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material // High Temperature. 2000. Vol. 38. Issue 6. Pp. 921–925. DOI: 10.1023/a:1004149625276

REFERENCES

1. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A., Dashtiev I.Z. Features of the creation of structures made of polymer composites in the presence of requirements for their fire safety indicators. *Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*. 2018; 2(189):62-69. (rus).
2. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(2):9-30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30 (rus).
3. Evtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Rudakova T.A., Ozerin A.N. Effect of aluminum hydroxide on the fireproofing properties of ammonium polyphosphate–pentaerythritol-based intumescent coating. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2019; 16(5):1389-1398. DOI: 10.1007/s11998-019-00221-6
4. Grigoriev Yu.A., Evtushenko Yu.M., Kuchkina I.O., Rudakova T.A. Development trends and test methods of fire-proofing coatings. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2019; 5:39-44. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-5-39-44 (rus).
5. Andryushkin A.Yu., Tsoy A.A. The methods of definition of fire rating of flame-retardant coating for steel structures in hydrocarbon jet fire. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2016; 2:45-53. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V82/7.pdf
6. Tambe S., Kao Y.-H., Jeng S.-M. *Development of next generation burner characteristics for fire testing of power plant materials and components. DOT/FAA/TC-13/38*. Report FAA DoT USA. 2015; 52. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-13-38.pdf
7. Marker T.R. *Aircraft Materials Fire Test Handbook, Revision 3. DOT/FAA/TC-17/55*. Federal Aviation Administration, Atlantic Citi, USA, 2019; 573. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC17-55.pdf
8. Le Neve S. Fire behaviour of structural composite materials. *The 6th Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*. Atlantic City, USA, 2010; 48.
9. Laborie D. Fire test burner evaluation. *International Aircraft Systems Fire Protection Working Group Meeting Atlantic City*. New Jersey, USA, 2015; 8. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/systems/Oct-15Meeting/Laborie-1015-FireTestBurnerEvaluation.pdf.
10. Barbotko S.L., Kirienko O.A., Volnyj O.S., Lutsenko A.N. Analysis of the fire danger of aircraft engines motor-gondols and other fire hazardous zones; use of fire tests methods of materials and constructive elements to correspond of aviation norms. *Air safety problems*. 2017; 5:3-24. (rus).
11. Barbotko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. *Evaluation of aviation materials' fire safety: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features* / by E.N. Kablov (ed.). Moscow, VIAM publ., 2018; p. 424. (rus).
12. Bazhenov S.V., Naumov Yu.V. Prediction of the dynamics of fire — retarded metal constructions heating on the basis of determination of thermal insulation characteristics of fire retardant coatings (laboratory method). *Fire Safety*. 2005; 1:50-54. (rus).

13. Rybka E.A., Andronov V.A. Laboratory installation for an estimation of fireproof efficiency of reactive coverings for metal constructions taking into account parameters of development of a real fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(10):19-24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902909 (rus).
14. Eliseev V.N., Tovstonog V.A. *Heat transfer and heat testing of material and aerospace structures with radiant heating*. Moscow, BMSTU Publ., 2014; 396. (rus).
15. Garashchenko A.N., Strakhov V.L., Rudzinsky V.P., Ryzhkov A.A. Testing of methods for calculating the swelling fire protection of building structures on the example of the Hensotherm 4KS coating. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1999; 8(5):29-37. (rus).
16. Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F. Heat and fire protection of multilayer structures based on the use of foaming coatings. *Heat Transfer Research*. 2005; 36(7):543-556. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i7.20
17. Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F. Thermal protection of multilayer containers against the effect of fires. *High Temperature*. 2008; 46(2):254-260. DOI: 10.1134/s10740-008-2015-9
18. Korolchenko A.Ya., Garashchenko A.N., Garashchenko N.A., Rudzinskiy V.P. Calculations of the thickness of fire protection, providing the required indicators of fire danger of wood-glued structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):49-56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629 (rus).
19. Vinogradov A.V., Kulkov A.A., Pashutov A.V. On the possibilities of studying the characteristics and modeling of full-scale thermal loads on samples and components of structures made of composite materials in the conditions of the laboratory experimental base of Public Corporation CRISM. *Moscow Institute for Heat Technology*. 2014; 14(1):136-144. (rus).
20. Kurmasova I.A., Vinogradov A.V., Solovyova E.I. Research of the materials for thermai insulation suits. *Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*. 2018; 2(189):62-69. (rus).
21. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material. *High Temperature*. 2000; 38(6):921-925. DOI: 10.1023/a:1004149625276

Поступила 09.10.2020, после доработки 11.11.2020; принята к публикации 23.11.2020
Received October 9, 2020; Received in revised form November 11, 2020; Accepted November 23, 2020

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; РИНЦ ID: 592555; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

ВИНОГРАДОВ Александр Всеволодович, канд. техн. наук, начальник лаборатории, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

ДАШТИЕВ Идрис Зилфикарович, д-р техн. наук, начальник отделения, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; РИНЦ ID: 904740; ORCID: 0000-0001-5098-6064; e-mail: plastickon@yandex.ru

КОБЫЛКОВ Никита Валерьевич, инженер, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1430-5625; e-mail: kobilkov-k@yandex.ru

ТЕРЕХОВ Сергей Александрович, инженер, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2895-3885; e-mail: s-terekh75@rambler.ru

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Researcher, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ID RISC: 592555; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Aleksandr V. VINOGRADOV, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Chief, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

Idris Z. DASHTIEV, Dr. Sci. (Eng.), Head Of Sub-Branch, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ID RISC: 904740; ORCID: 0000-0001-5098-6064; e-mail: plastickon@yandex.ru

Nikita V. KOBYLKOV, Engineer, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1430-5625; e-mail: kobilkov-k@yandex.ru

Sergey A. TEREKHOV, Engineer, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2895-3885; e-mail: s-terekh75@rambler.ru

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.40-49
УДК 699.81
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Использование диаграмм совместимости для оптимизации исследования огнезащитных материалов

© **Т.Ю. Еремина, Д.А. Корольченко, Ф.А. Портнов** ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из актуальных вопросов в науке и образовании является проведение исследований междисциплинарного уровня. Основной целью развития таких исследований в международной практике признано объединение интеллектуальных ресурсов и научно-производственной инфраструктуры.
Основная (аналитическая) часть. Авторами предлагается методологический подход к исследованию, основанный на разделении междисциплинарных методов на группы по уровню масштаба объекта исследования (материала): микроуровень, надмолекулярный уровень, исследование материала, исследование конструкции. В работе представлены методы, используемые при исследовании на каждом из указанных уровней. На основании проведенного разделения на уровни исследования, а также анализа возможных используемых экспериментальных методов на каждом уровне предлагается оптимизация исследования эксплуатационных свойств строительных материалов и огнезащитных материалов посредством применения диаграммы совместимости.
Использование диаграммы совместимости. Методология исследования. В качестве практического примера использования диаграмм совместимости выбрано исследование огнезащитной эффективности группы эфиров кислот фосфора при модифицировании древесины. В работе определен ряд методов, подходящих для предложенной диаграммы совместимости: метод элементного анализа, метод оценки энергии Гиббса, метод оценки удельной поверхности образца, электронная микроскопия, методы оценки пожароопасных характеристик древесины, метод сорбции воды и метод оценки прочности, и метод оценки биозащищенности.
Выводы. Впервые предложен алгоритм обобщения эмпирических данных о механохимических характеристиках материалов с использованием междисциплинарных методов в виде диаграммы совместимости. Данная методология позволяет оптимизировать исследования для любых композитных материалов, сохранив целевые методы исследования и исключив нецелесообразные и сопутствующие экспериментальные исследования со снижением трудозатрат и, как следствие, влияния на окружающую среду.

Ключевые слова: пожарная безопасность; эксплуатационные характеристики конструкций; физико-химические свойства материалов; планирование эксперимента; междисциплинарные методы исследования

Благодарности. Работа была финансово поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» #FSWG-2020-0007).

Для цитирования: *Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А., Портнов Ф.А.* Использование диаграмм совместимости для оптимизации исследования огнезащитных материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 40–49. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.40-49

✉ *Портнов Федор Александрович*, e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

Using compatibility charts to optimize research into fire retardants

© **Tatyana Yu. Eremina, Dmitriy A. Korolchenko, Fedor A. Portnov** ✉

National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Interdisciplinary research is a most relevant issue in science and education. The integration of intellectual resources with research and production infrastructure is acknowledged as the main goal of interdisciplinary research in the international practice.
The main (analytical) part. The authors propose the following methodological approach to the study, based on the distribution of interdisciplinary methods into groups by the scale of the research subject (material). In this case, the studies have the following levels: microlevel, supramolecular level, material research, design research. The paper presents research methods used at each of these levels. The co-authors propose to optimize the study

of performance characteristics of building materials and fire retardants through the use of a compatibility chart with regard for the study levels and the analysis of methods of experimental research at each level.
Using a compatibility chart. The methodology of the study. A research into the fire retardant efficiency of esters of phosphoric acid, used to modify wood, was selected as a practical example for compatibility diagrams. The project encompasses a number of methods applicable to compatibility charts: the method of elemental analysis, the Gibbs energy assessment method, the sample surface assessment method, the electron microscopy method, methods of assessing fire-hazardous characteristics of wood, the water sorption method, strength and biosecurity assessment methods.
Conclusions. The co-authors first proposed an algorithm for generalizing the empirical data on mechanochemical characteristics of materials using interdisciplinary methods in the form of a compatibility chart. This methodology optimizes research into any composite materials though it preserves targeted research methods and eliminates impractical and concomitant experimental studies, thus, reducing labour costs and environmental impacts.

Keywords: fire safety; performance characteristics of structures; physical and chemical properties of materials; fire retardant; experimental design; interdisciplinary research methods

Acknowledgments. The research enjoyed the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project name: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

For citation: Eremina T.Yu., Korolchenko D.A., Portnov F.A. Using compatibility charts to optimize research into fire retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):40-49. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.40-49 (rus).

✉ *Fedor Aleksandrovich Portnov*, e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

Введение

Одним из актуальных вопросов в науке и образовании является проведение междисциплинарных исследований. В Российской Федерации в последнее время этому направлению уделяется особое внимание на самом высоком уровне формирования государственной научно-технической политики. Основной целью развития междисциплинарных исследований в международной практике признано объединение интеллектуальных ресурсов и научно-производственной инфраструктуры [1–2].

В нашей стране для снижения пожарной опасности при использовании в строительстве металлических и деревянных конструкций, а также кабельной продукции применяется большое количество отечественных и зарубежных огнезащитных материалов [3–10]. Эти материалы имеют как органическую, так и неорганическую основу, прошли необходимые огневые испытания по стандартам и получили сертификат на практическое использование в строительстве. В связи с этим нет специальных требований, регламентированных стандартами и нормами пожарной безопасности, к огнезащитным материалам для их применения в обычных условиях. Для оценки свойств огнезащитных материалов используются нормативные документы, предназначенные для продукции лакокрасочной отрасли, — лаков, красок. При разработке огнезащитных материалов эти требования должны быть учтены с достаточно большой спецификой междисциплинарных методов исследования механохимического конструирования материалов с заданными параметрами структуры и эксплуатационными свойствами. Эти требования связаны с химической и физической агрессией, вызываемой как внешней средой, так и непосредственно составляющими материалы элементами. Кроме того, должна быть исследована адгезия материалов (из диаграммы совместимости) огнезащитных составов к металлу, дереву и кабелям, технологические факторы при их нанесении на конструкции, зависящие от физико-химических процессов в составе различных огнезащитных материалов.

Методология междисциплинарных исследований предполагает несколько этапов научного исследования, разработка которых является одной из сложнейших задач, объединяющей ученых разных специальностей в моделировании блок-схемы исследований.

Основная (аналитическая) часть

Выбор междисциплинарных методов исследования для механохимического конструирования материалов с заданными параметрами структуры и эксплуатационными свойствами состоит из нескольких этапов, в ходе которых рассматриваются:

- методы механохимического создания материалов;
- физико-химические методы исследования;
- программы огневых и других испытаний.

Известно, что для исследования при механохимическом конструировании материалов с заданными параметрами структуры и эксплуатационными свойствами используются методы термогравиметрического анализа структуры, рентгенофазовой спектроскопии, хромато-масс-спектрограммы, элементного анализа, ИК-спектроскопии, pH-метрии.

Авторами предлагается следующий методологический подход к исследованию, основанный на раз-

делении междисциплинарных методов на группы по уровню масштаба объекта исследования (материала). В этом случае исследования разделяются на следующие уровни:

- микроуровень;
- надмолекулярный уровень;
- исследование материала в целом;
- исследование конструкции.

В табл. 1 представлены методы, используемые при исследовании на микроуровне и надмолекулярном уровне исследования.

Выбор методов исследования процессов структурообразования под влиянием техногенных факторов (пожара), включая чрезвычайные ситуации, обусловлен факторами, способными повлиять на снижение огнезащитной эффективности покрытия: адгезия, его прочностные характеристики, стойкость к воздействию агрессивных сред (включая влагу), срок годности до нанесения на конструкцию и др. Например, большое количество гидрофобных огнезащитных материалов через месяц нахождения в реальных условиях эксплуатации за счет аккумулирования влаги и различных агрессивных паров и газов теряет свою огнезащитную эффективность от 50 до 100 % [11–12].

Большое влияние на качество и долговечность огнезащитной обработки оказывают условия, в которых эксплуатируются конструкции. В связи с этим, например, при разработке огнезащитных составов для древесины необходимо оценить их свойства при влиянии повышенной и отрицательной температур, различной влажности воздуха, агрессивных паров и газов, атмосферных осадков. Следует иметь данные по сроку годности, времени и степени высыхания, прочности на изгиб, прочности на удар, биологической стойкости.

В соответствии с этим с микроуровня и надмолекулярного уровня исследования переходят к исследованию материалов и конструкций с сохранением физико-химических характеристик изучаемого объекта (табл. 2).

Для того чтобы оценить и спрогнозировать поведение того или иного огнезащитного материала (применяемого на практике или вновь разрабатываемого) с истечением конкретного срока эксплуатации, эффективными являются методы контроля качества структуры материала (получение данных о характеристиках поверхности композиций — электронная микроскопия), оценка краевого угла смачивания, проведение ИК-спектроскопии, исследование огнезащитных составов методом pH-маркера (комплексное исследование химического состава водных растворов (жесткость, анионная хроматография, pH-метрия)), данных дифференциально-термического анализа (ДТА) и рентгенофазового анализа (РФА), значений эффективного коэффициента теплопроводности, хромато-масс-спектрограмм и др.).

Все вышеперечисленные показатели определяются путем отбора некоторого количества огнезащитного материала прямо с объекта (с подложки материала), где была произведена огнезащитная обработка, и сравнения их с показателями, полученными при исследовании свойств на моделях (после проведения исследований по методике искусственного старения).

На основании проведенного разделения на уровни исследования, а также анализа возможных применяемых экспериментальных методов на каждом уровне предлагается оптимизация исследования экс-

Таблица 1. Междисциплинарные методы исследования на микро- и надмолекулярном уровне
Table 1. Interdisciplinary methods of micro- and supramolecular research

Методы исследования на микроуровне Microlevel research methods	Методы исследования на надмолекулярном уровне Methods of research at the supramolecular level
Физико-химические характеристики **Physical and chemical characteristics** • Оценка теплопроводности / Heat conductivity assessment • Оценка температуропроводности Thermal conductivity assessment • Оценка теплоемкости / Heat-adsorption capacity assessment • Термо-гравиметрический анализ / Thermo-gravimetric analysis • Изотермическая калориметрия / Isothermal calorimetry • Определение энергии Гиббса / Gibbs energy determination **Качественный элементный анализ** **High-quality elemental analysis** • Рентгенофазовая спектроскопия / X-ray spectroscopy • Хромато-масс-спектрограмма / Chromato-mass-spectrogram • Элементный анализ / Elemental analysis • ИК-спектроскопия / IR spectroscopy • pH-метрия / pH measurement	**Оценка пористой структуры** **Porous structure assessment** • Удельная поверхность Specific surface • Пористость Porosity • Распределение пор по размерам Distribution of pores by size **Оценка структуры поверхности** **Surface structure assessment** • Электронная микроскопия Electronic microscopy • Краевой угол смачивания Limiting wetting angle

Таблица 2. Междисциплинарные методы исследования на уровне материалов и конструкций
Table 2. Interdisciplinary methods of research at the level of materials and designs

Методы исследования на уровне материала Material level research methods	Методы исследования на уровне конструкции Design level research methods
Эксплуатационные характеристики **Performance characteristics** • Оценка водопоглощения / Assessment of water absorption • Оценка водопроницаемости / Assessment of water permeability • Оценка гидрофобности / Assessment of hydrophobic behaviour • Оценка паропроницаемости / Assessment of vapour permeability • Определение адгезии / Adhesive capacity • Оценка термостойкости / Assessment of heat resistance • Оценка теплового старения / Assessment of thermal aging **Огнезащитные характеристики** **Fire retardant characteristics** • Оценка показателей пожарной опасности Assessment of fire hazards • Оценка огнезащитной эффективности Assessment of fire retardant efficiency **Механические характеристики** **Mechanical characteristics** • Оценка прочности / Strength assessment • Оценка растяжения / Stretching assessment • Оценка сдвига / Shift assessment • Оценка изгиба / Assessment of bending **Методы контроля качества структуры материала** **Methods of control over the quality of the structure of the material** • Получение данных о характеристиках поверхности композиций (электронная микроскопия) Obtaining data on characteristics of the surface of compositions (electron microscopy) • Оценка краевого угла смачивания Assessment of the limit wetting angle • Проведение ИК-спектроскопии IR spectroscopy • Исследование огнезащитных составов методом pH-маркер (комплексное исследование химического состава водных растворов (жесткость, анионная хроматография, pH-метрия)) Using pH markers to study fire retardants (a complex study of the chemical composition of water solutions (hardness, anion chromatography, pH measurement))	**Эксплуатационные характеристики** **Performance characteristics** • Оценка коррозионной стойкости Assessment of corrosive resistance • Оценка эрозии Erosion assessment • Оценка биостойкости Assessment of biostability • Оценка УФ устойчивости Assessment of UV stability • Оценка термостойкости Assessment of heat resistance **Пожароопасные характеристики** **Fire hazardous characteristics** • Оценка предела огнестойкости Assessment of the fire resistance limit **Механические испытание** **Mechanical testing** • Крупномасштабные испытания Large-scale testing

плуатационных свойств строительных материалов и огнезащитных материалов посредством использования диаграммы совместимости (рис. 1).

Предложенная диаграмма позволяет провести всестороннее исследование свойств изучаемого объекта с последующим исключением промежуточных методов для прогнозирования эксплуатационных характеристик типичных по своим свойствам групп материалов.

Использование диаграммы совместимости. Методология исследования

В качестве примера можно рассмотреть исследование пожарной опасности древесины. В ряде работ приведены примеры исследования различных факторов, влияющих на ее характеристики. В качестве исследуемой группы выбрана древесина, обработанная схожими фосфорсодержащими модификаторами — 20%-ми водными растворами эфиров фосфористой кислоты (диметилфосфит (ДМФ), диэтилфосфит (ДЭФ), дипропилфосфит (ДПФ), дибутилфосфит (ДБФ), дифенилфосфит (ДФФ)), а также полифосфата аммония [13–16].

В данной статье выбран ряд методов, которые укладываются в предложенную диаграмму совместимости (рис. 2). Очевидно, что для получения определенных критериев и результатов нет необходимости учитывать все возможные группы методов,

Рис. 1. Диаграмма совместимости методов исследования
Fig. 1. The chart of compatibility of research methods

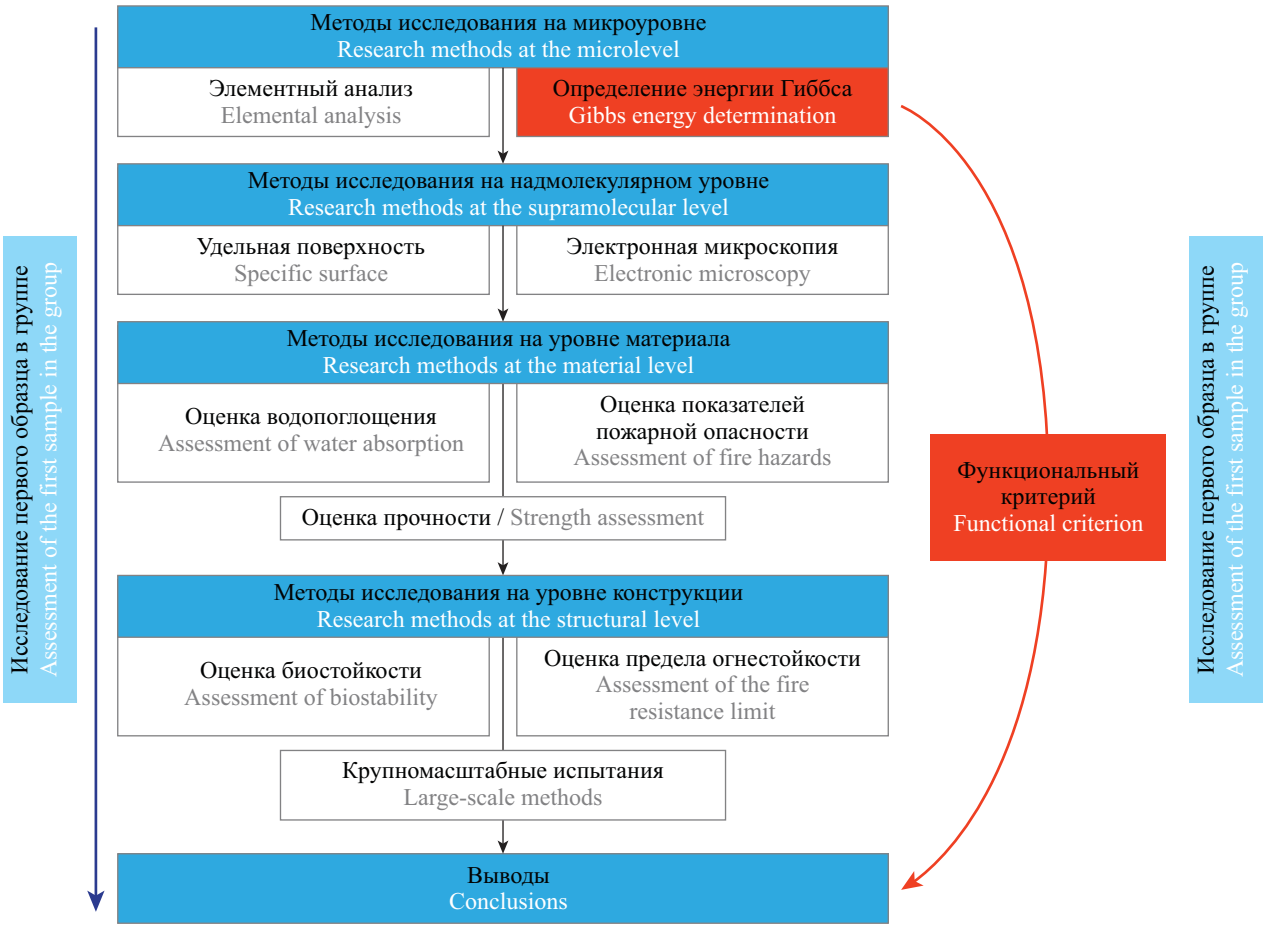


Рис. 2. Применение диаграммы совместимости
Fig. 2. Compatibility chart application

которые не имеют ключевой связи с интересующей нас величиной. Так, для исследования огнезащищенности древесины не будет проведено исследование механических характеристик, тем не менее данный вид исследования будет включен в диаграмму совместимости, так как при необходимости такие исследования могут быть проведены.

В качестве используемых методов на микроуровне выбраны метод элементного анализа и метод оценки энергии Гиббса [17–18]. На надмолекулярном уровне используется метод оценки удельной поверхности [19], данные которого также применяются для расчета энергии Гиббса, а также метод электронной микроскопии. Для исследования материала древесины могут быть использованы методы оценки пожароопасных характеристик древесины, метод сорбции воды [20] и метод оценки прочности. В данной работе метод оценки прочности принимается как не имеющий ключевой значимости для конечного искомого результата, поэтому проводиться не будет. Кроме того, основные выводы по огнезащитной эффективности выбранных модификаторов могут быть распространены на уровень конструкций, и в дополнение проведены исследования биостойкости исследуемой древесины.

Результаты и обсуждение

Результаты элементного анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3. Содержание фосфора в поверхностном слое модифицированной древесины до и после термического разложения

Table 3. The content of phosphorus in the surface layer of modified wood before and after thermal decomposition

Показатель Parameter	Модификатор поверхностного слоя Surface layer modifier					
	ДМФ DMP	ДЭФ DEP	ДПФ DPP	ДБФ DBP	ДФФ DPP	ПФА-1 PPA-1
До термического разложения Before thermal decomposition						
% P	2,87	**3,57**	2,6	2,65	2,45	2,21
После термического разложения After thermal decomposition						
% P	0,85	**4,7**	0,41	0,37	1,06	0,35

На основании полученных результатов можно отметить, что после термического разложения в углистом слое наблюдается наличие химически связанного фосфора, что характеризует эффективное химическое взаимодействие.

Результаты расчета изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса) приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты оценки изменения изобарно-изотермического потенциала образцов

Table 4. Assessment of changes in the Gibbs thermal dynamic potential of samples

Показатель Parameter	Модификатор поверхностного слоя Surface layer modifier					
	ДМФ DMP	ДЭФ DEP	ДПФ DPP	ДБФ DBP	ДМФ DMP	ДЭФ DEP
До термического разложения Before thermal decomposition						
ΔG, Дж ΔG, J	–12,68	**–14,5**	– 4,94	– 6,97	–10,16	–2,71
После термического разложения/ After thermal decomposition						
ΔG, Дж ΔG, J	14,31	**–14,48**	4,05	2,43	–13,69	12,35

Согласно положениям термодинамики, с одной стороны, наибольшее отрицательное значение изменения изобарно-изотермического потенциала характеризует наиболее активные процессы изменения системы, с другой стороны, значение изменения изобарно-изотермического потенциала, близкое к нулю, характеризует устойчивость системы при термодинамическом процессе. При анализе полученных результатов наблюдается высокая активность в процессе химического модифицирования при использовании модификаторов ДМФ, ДЭФ, ДФФ, при этом наибольшая устойчивость при термическом разложении наблюдается для древесины, модифицированной ДЭФ. Полученные данные коррелируются с результатами элементного анализа.

Результаты оценки удельной поверхности (табл. 5) показывают значительное уменьшение размера пор как до термического разложения, так и после в случае использования ДМФ в качестве модификатора, что является результатом эффективного химического закрепления модификатора в пористой структуре древесины. Эта закономерность наблюдается и на снимке электронного микроскопа древесины, модифицированной ДЭФ, после термического разложения (рис. 3). В результате оценки биостойкости по ГОСТ 9.048–89[1] получено, что модифицирование подверженной воздействию плесневых грибов древесины обеспечивает ее 100%-ную биостойкость при использовании всех указанных выше модификаторов. В табл. 6 приведена информация о водопоглощении образцов модифицированной древесины, которые коррелируются с вышеперечисленными результатами.

[1] ГОСТ 9.048–89. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 июня 1989 г. № 2019.

Таблица 5. Удельная поверхность модифицированной древесины до и после термического разложения

Table 5. Specific surface of modified wood before and after thermal decomposition

Показатель Parameter	Модификатор поверхностного слоя Surface layer modifier					
	ДМФ DMP	ДЭФ DEP	ДПФ DPP	ДБФ DBP	ДФФ DPP	ПФА-1 PPA-1
До термического разложения Before thermal decomposition						
$S_{уд}$, см^2/г S_{surf}, cm^2/g	73,36	**52,88**	75,43	65,74	55,6	64,13
После термического разложения After thermal decomposition						
$S_{уд}$, см^2/г S_{surf}, cm^2/g	58,56	**17,08**	71,49	70,37	18,28	57,62

Таблица 6. Водопоглощение модифицированной древесины

Table 6. Water absorption of modified wood

Показатель Parameter	Модификатор поверхностного слоя Surface layer modifier					
	ДМФ DMP	ДЭФ DEP	ДПФ DPP	ДБФ DBP	ДФФ DPP	ПФА-1 PPA-1
a_m, %	215,8	**155,5**	221,9	193,4	163,5	188,6

В качестве показателей пожарной опасности модифицированной древесины выбраны группы горючести и дымообразующей способности. Результаты оценки выбранных показателей приведены в табл. 7.

На основании полученных результатов можно построить ряд зависимостей. Высокая эффективность выбранных модификаторов объясняется их высокой активностью при взаимодействии с древесиной. Это наблюдается при исследовании структуры модифицированной древесины и отражается в результатах определения изменения

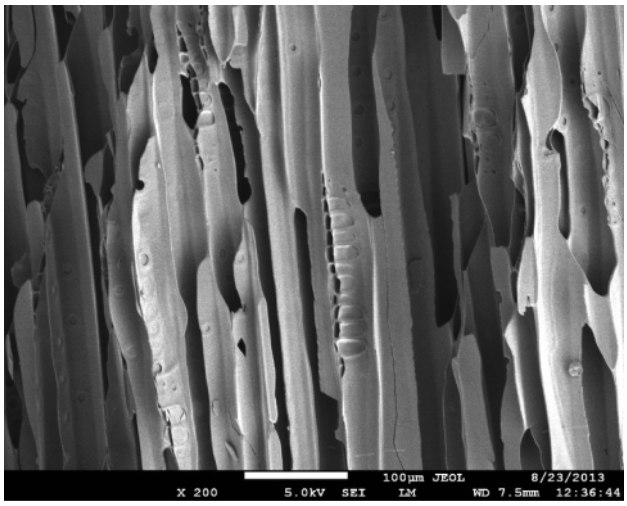


Рис. 3. Снимок электронного микроскопа поверхности древесины, модифицированной ДЭФ после термического разложения

Fig. 3. An electron microscopy image of the surface of wood modified by DEF after thermal decomposition

изобарно-изотермического потенциала при сгорании данного образца. Благодаря наблюдающейся зависимости результатов исследования на микроуровне и на уровне материала (конструкции) возможно избежать проведения дальнейших многочисленных исследований данной группы модификаторов, основываясь лишь на методах, позволяющих оценивать микроуровень. Существуют значительные недостатки применения большого количества экспериментальных методов:

- большие финансовые вложения и трудозатраты;
- негативное влияние на окружающую среду (например, при натурных испытаниях).

Очевидно, что для прогнозирования характеристик строительных и огнезащитных материалов должны быть подобраны целевые экспериментальные методы. Подобные методы должны соответствовать функциональным критериям изучаемой группы материалов.

Таблица 7. Показатели пожарной опасности исходной и модифицированной древесины

Table 7. Fire hazard characteristics of original and modified wood

Показатель Parameter	Исходная древесина Original wood	Модификатор поверхностного слоя / Surface layer modifier					
		ДМФ DMP	ДЭФ DEP	ДПФ DPP	ДБФ DBP	ДФФ DPP	ПФА-1 PPA-1
Потеря массы, % Loss of mass, %	79	8,6	**8,5**	10,9	11,5	9,5	8,7
Группа огнезащитной эффективности Fire retardant efficiency group	III	I	**I**	II	II	II	I
D_m, м^2/кг D_m, m^2/kg	970…1013	450…470	**130…140**	640…680	600…640	740…780	400…440

Выводы

Впервые предложен алгоритм обобщения эмпирических данных о механохимических характеристиках материалов с использованием междисциплинарных методов в виде диаграммы совместимости.

Показан практический пример использования диаграммы совместимости.

Данная методология позволяет оптимизировать исследования для любых композитных материалов, сохранив целевые методы исследования и исключив нецелесообразные и сопутствующие экспериментальные исследования со снижением трудозатрат и, как следствие, влияния на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гевель Е.В., Майничева А.Ю., Мыглан В.С.* Проблемы сохранения памятников деревянного зодчества г. Енисейска: роль междисциплинарных исследований // Баландинские чтения. 2016. Т. 11. № 1. С. 83–89. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27238485
2. *Ширина Е.В., Крюков К.М.* BIM-технологии в междисциплинарных исследованиях технических и гуманитарных наук // Актуальные проблемы науки и техники 2020 : мат. национальной науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 25–27 марта 2020 г. Ростов н/Д., 2020. С. 1300–1301. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44086434
3. *Маковей В.А.* Направления развития огнезащиты материалов, изделий и конструкций, огнезащитных веществ и материалов // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2016. № 1. С. 6–13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25953543
4. *Смелков Г.И., Рябико А.И., Пехотиков В.А., Грузинова О.И., Дармина Н.М.* К вопросу об актуализации нормативной базы на средства огнезащиты кабелей // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 2020. С. 400–402.
5. *Кропотова Н.А.* Огнезащита металлических конструкций быстровозводимых зданий // Ройтмановские чтения : сб. мат. VIII науч.-практ. конф. М., 2020. С. 65–70. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880349
6. *Yew M.C., Ramli Sulong N.H., Yew M.K., Amalina M.A., Johan M.R.* Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings // Progress in organic coatings. 2015. Vol. 78. Pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.10.006
7. *Nemtsov I.V.* Fire protection in construction // Science of the XXI century: the experience of the past — a look into the future. 2015. Pp. 103–108.
8. *Дейнеко В.А., Зыбин А.О., Торопчина Т.Ю.* Comparative study of fire-retardant indicators of flame retardant impregnations for cellulosic materials // Неделя науки СПбПУ : мат. науч. конф. с междунар. участием. 19–24 ноября 2018 г. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. Pp. 84–87. URL: https://week-science.spbstu.ru/userfiles/volumes/86/file.pdf
9. *Ройтман В.М.* Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Пожнаука, 2001. 382 с.
10. *Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Frolova M.A.* Determination of size properties of the organomineral insulation nanofiller based on the wood matrix // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publ., 2016. Vol. 177. P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012063
11. *Руденко Б.Д., Плотников С.М.* Исследование процесса структурообразования искусственных строительных конгломератов на основе древесных частиц. Роли : Open Science Publishing, 2017. 195 с.
12. *Руденко Б.Д.*, *Плотников С.М.* Формирование структуры цементно-древесного композита при обработке известью древесного заполнителя // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 34. С. 82–84. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22573951
13. *Покровская Е.Н.* Огнезащита деревянных конструкций модификацией в тонком поверхностном слое // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 86–90. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35333318
14. *Анохин Е.А., Полищук Е.Ю., Савиньков А.Б.* Применение огнезащитных пропиточных композиций для снижения пожарной опасности деревянных конструкций с различными сроками эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 2. С. 22–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35.
15. *Pokrovskaya E.N.* Survey of the designs of wooden architectural monuments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publ., 2020; 728:012003. DOI: 10.1088/1757-899X/728/1/012003

16. *Pokrovskaya E.N.* Increase of fire protection and strength of wooden structures by modification in a thin surface layer by nanodispersion composites // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1425. P. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012091
17. *Tutygin A.S., Shinkaruk A.A., Aisenstadt A.M., Frolova M.F., Pospelova T.A.* Ways to increase and monitor bearing capacity of soils // Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety. 2013. Vol. 7. Part 1. Pp. 37–45.
18. *Айзенштадт А.М.* Термодинамическая оптимизация состава нанокомпозитов горных пород // Инновационные материалы и технологии для строительства в экстремальных климатических условиях : мат. I Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Архангельск, 02–04 декабря 2014 г. Архангельск, 2014. 244 с.
19. *Ruthven D.M.* Principles of adsorption and adsorption processes. New York : John Wiley & Sons, 1984. 443 p.
20. *Кельцев Н.В.* Основы адсорбционной техники. М. : Мир, 1984. 592 с.

REFERENCES

1. Gevel E.V., Mainicheva A.Yu., Myglan V.S. Problems of preservation of monuments of wooden architecture in the town of Yeniseisk: a role of interdisciplinary research. *Balandin Reading*. 2016; 11(1):83-89. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27238485 (rus).
2. Shirina E.W., Kryukov K.M. BIM-technology in interdisciplinary research of technical and humanities. *Current problems of science and technology 2020: Materials of the National Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, March 25-27, 2020*. Rostov-on-Don, 2020:1300-1301. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44086434 (rus).
3. Makovei V.A. Directions for the development of fire retardant materials, products and designs, fire retardants and materials. *Emergencies: Industrial and Environmental Safety*. 2016; 1:6-13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25953543 (rus).
4. Smelkov G.I., Ryabiko A.I., Pekhotintsev V.A., Gruzinova O.I., Darmina N.M. To the question of updating the regulatory framework on the means of fire *protection cables. Modern fire-safe materials and technologies : the collection of materials IV of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. Ivanovo, 2020:400-402. (rus).
5. Kropotova N.A. Fire protection of metal structures of fast-building buildings. *Roitman readings : 8th Scientific and Practical Conference Collection*. Moscow, 2020:65-70. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880349 (rus).
6. Yew M.C., Ramli Sulong N.H., Yew M.K., Amalina M.A., Johan M.R. Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings. *Progress in organic coatings*. 2015; 78:59-66. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.10.006
7. Nemtsov I.V. Fire protection in construction. *Science of the XXI century: the experience of the past — a look into the future*. 2015:103-108.
8. Deyneko V.A., Zybin A.O., Toropchina T.Yu. Comparative study of fire-retardant indicators of flame retardant impregnations for cellulosic materials. *Science Week SPBPU : Proceedings of a Scientific Conference with International Participation. November 19-24, 2018*. Saint Petersburg, POLYTECH-PRESS Publ., 2018; 84-87. (rus).
9. Roitman V.M. *Engineering solutions to assess the fire resistance of projected and reconstructed buildings*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2001; 382. (rus).
10. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Frolova M.A. Determination of size properties of the organomineral insulation nanofiller based on the wood matrix. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publ., 2016. Vol. 177. P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012063
11. Rudenko B.D., Plotnikov S.M. *Study of the process of structure formation artificial building conglomerates based on wood particles*. Raleigh, Open Science Publishing, 2017; 195. (rus).
12. Rudenko B.D., Plotnikov S.M. Formation of structure of cement-wood composite the Limingwood-filler. *Actual problems of the forestry complex*. 2012; 34:82-84. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22573951 (rus).
13. Pokrovskaya E.N. Fire protection of wooden constructions by modifying the thin surface layer. *Fire and Emergencies: prevention, elimination*. 2018; 2:86-90. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35333318 (rus).

14. Anokhin E.A., Polischuk E.Yu., Savinkov A.B. Use of fire-retardant impregnating compositions for reducing fire hazard of wooden structures of various lifetimes. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(2):22-35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35 (rus).
15. Pokrovskaya E.N. Survey of the designs of wooden architectural monuments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publ., 2020; 728:012003. DOI: 10.1088/1757-899X/728/1/012003
16. Pokrovskaya E.N. Increase of fire protection and strength of wooden structures by modification in a thin surface layer by nanodispersion composites. *Journal of Physics: Conference Series.* 2019; 1425:012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012091
17. Tutygin A.S., Shinkaruk A.A., Aisenstadt A.M., Frolova M.F., Pospelova T.A. Ways to increase and monitor bearing capacity of soils. *Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety.* 2013; 7(1): 37-45.
18. Eisenstadt A.M. Thermodynamic optimization of the composition of nanocomposite rocks. *Innovative Materials and Technologies for Construction in Extreme Climatic Conditions : materials of the 1st All-Russian scientific and technical conference with international participation. Arkhangelsk, December 02–04, 2014.* Arkhangelsk, 2014; 244. (rus).
19. *Ruthven D.M. Principles of adsorption and adsorption processes*. New York, John Wiley & Sons, 1984; 443.
20. Keltsev N.V. *Basics of adsorption technique*. Moscow, Mir Publ., 1984; 592. (rus).

Поступила 03.11.2020, после доработки 30.11.2020; принята к публикации 10.12.2020
Received November 3, 2020; Received in revised form November 30, 2020; Accepted December 10, 2020

Информация об авторах

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 5594606060; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

Information about the authors

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.50-60
УДК 656.13;614.84

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В

© **А.И. Недобитков** ✉

Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева
(Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19)

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что проблема дифференциации первичного и вторичного короткого замыкания очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования медного проводника автомобильной электрической сети, имеющего признаки короткого замыкания, для установления причины его повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.
Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, микротвердомера DuraScan 20, инфракрасного тепловизора Fluke Ti400.
Результаты и обсуждение. Экспериментально доказано, что микротвердость медного проводника, подвергнутого первичному короткому замыканию, отличается от значений микротвердости медных проводников, подвергшихся токовой перегрузке или внешнему высокотемпературному воздействию. Приведены снимки участков измерения микротвердости медного проводника, подвергшегося первичному короткому замыканию. Даны результаты энергодисперсионного анализа и характерные диагностические признаки, позволяющие установить причину повреждения медного проводника при пожаре (первичное или вторичное короткое замыкание). Измерена температура медного проводника при искровом и дуговом протекании короткого замыкания. Экспериментально подтверждена возможность применения расчетного метода определения температуры проводника при коротком замыкании.
Выводы. Предложен метод дифференциации первичного или вторичного короткого замыкания медного проводника автомобильной электрической сети. Показано, что метод измерения микротвердости может быть использован в качестве вспомогательного для метода растровой микроскопии. Приведенные в статье результаты могут быть использованы специалистами при исследовании медных проводников, изымаемых из сгоревших транспортных средств, в целях установления механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; медный проводник; растровая электронная микроскопия; микротвердомер; пожарно-техническая экспертиза

Для цитирования: *Недобитков А.И.* О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 50–60. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.50-60

✉ *Недобитков Александр Игнатьевич*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

On specific short circuit parameters of 12 V automobile electric systems

© **Alexandr I. Nedobitkov** ✉

D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University
(Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The data presented in the article show that the problem of differentiating primary and secondary short circuits is very important. The purpose of the article is to develop a scientifically grounded research method for copper conductors of automobile electric systems showing signs of a short circuit to identify the cause of its damage in a fire investigation.
Materials and methods. The research was conducted with the help of JSM-6390LV scanning electron microscope having an energy dispersive microanalysis unit attached, DuraScan 20 microhardness tester, and Fluke Ti400 infrared thermal imager.
Results and discussion. It is experimentally proven that the microhardness of a copper conductor subjected to a primary short circuit differs from that of a copper conductor subjected to an overcurrent or external high temperature. Images of microhardness measurement areas of a copper conductor subjected to a primary short

circuit are provided. The results of an energy dispersive analysis and characteristic diagnostic features allowing to establish the cause of the copper conductor damage in case of fire (primary or secondary short circuit) are provided. The temperature of the copper conductor is measured for short circuits that entail sparking and an arc. The applicability of the computational method for determining the conductor temperature in the event of a short circuit is experimentally proved.

Conclusions. A differentiation method is proposed for telling primary short circuits from secondary ones arising in copper conductors of automobile electrical systems. It is shown that the microhardness testing method can supplement the scanning electron microscopy method. The results provided in the article can be used by specialists to study copper conductors extracted from burned vehicles in order to identify the mechanism of their damage and, eventually, the cause of the car fire.

Keywords: fire; copper conductor; scanning electron microscopy; microhardness tester; fire investigation

For citation: Nedobitkov A.I. On specific short circuit parameters of 12v automobile electric systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):50-60. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.50-60 (rus).

✉ *Alexandr Ignatyevich Nedobitkov*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Введение

В работах [1–3] наглядно проиллюстрировано, что пожары, являясь тяжелой чрезвычайной ситуацией (ЧС), наносят значительный ущерб экономике государств, при этом пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым ЧС.

Авторами [4–13] приведены убедительные доказательства того, что ряд элементов электрической сети автомобиля может служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи.

В работе [14] отмечается, что в судебной пожарно-технической экспертизе методика установления первичности-вторичности короткого замыкания (КЗ) относится наряду с методикой обнаружения остатков интенсификаторов горения (средств поджога) к наиболее востребованной. И причина этого очевидна: так называемая электротехническая версия возникновения пожара рассматривается практически на каждом электрифицированном объекте [14].

В настоящее время для исследования оплавлений медных проводников, изымаемых с мест пожаров, применяются следующие методы: определение причины разрушения по внешним признакам (морфологическое исследование), рентгеноструктурный анализ (РСА), металлографический анализ [7, 15–21], растровая микроскопия [10, 11, 13].

Необходимо отметить, что в работе [22] указано на определенные сложности применения металлографии, при этом дословно сказано: «Имеется полная неопределенность, связанная с выбором места на шлифе, которое подлежит исследованию; на одном и том же шлифе объектив микроскопа может найти сколько угодно мест, которые на 100 % подтверждают первичность КЗ, а чуть передвинув шлиф, с не меньшей точностью можно найти все признаки вторичного КЗ».

Автором [23] указывается на изменения структуры оплавлений медных проводников от внешнего высокотемпературного воздействия при развитии пожара. В работе [24] предпринята попытка определения оптимального сечения оплавления медного проводника для изготовления шлифа, но проблема не решена, поскольку при пожаре на проводник действует большое число факторов, вызывающих многообразие структур в меди [13, 23]. Например, в работе [14] подчеркивается, что содержание кислорода не может выступать в качестве надежного критерия определения первичности-вторичности КЗ, поскольку на этот параметр оказывает влияние не только газовый состав окружающей атмосферы, но и, в частности, длительность электродугового процесса. Само по себе наличие дендритных структур также не коррелирует, судя по проведенным экспериментам, с условиями, характерными для первичного КЗ [14]. В свою очередь, в диссертационных работах [10, 11] приведены убедительные доказательства, что метод РСА не применим при исследовании оплавлений медных проводников, вызванных токовой перегрузкой. Также в работе [7] на основе обработки экспериментальных данных получен вывод о том, что с помощью метода РСА установление первичности или вторичности короткого замыкания в автомобильной электрической сети не представляется возможным. Объемные экспериментальные исследования, выполненные авторами [25], наглядно иллюстрируют, что применяемые в настоящее время такие методы исследования оплавлений медных проводников, как морфологическое исследование, РСА, металлографический анализ, не дают однозначного результата. Анализируя эволюцию развития методик экспертного исследования оплавлений медных проводников, к подобному выводу приходят авторы [26], категорично заявляя, что методические материалы Министерства внутренних дел Российской Федерации (РФ) и Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ по установлению признаков первичности-вторичности КЗ несовершенны и требуют существенной доработки, а их использование в судебных пожарно-технических экспертизах — нецелесообразно.

Целью данной работы является разработка научно-обоснованного метода исследования медных проводников автомобильной электрической сети с напряжением 12 В, оплавленных в результате короткого замыкания, для установления причины их повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

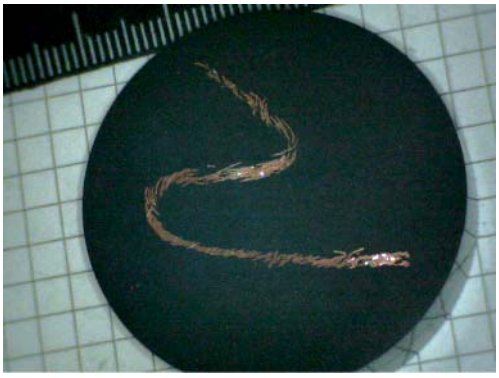
Исходя из этого, были поставлены следующие задачи исследования:

- на современном уровне автомобилестроения подтвердить, что короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания;
- экспериментально показать, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В протекает в искровом режиме и полностью соответствует закону Пашена;
- экспериментально подтвердить, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В при возникновении дуги возможно только при наличии между проводником и кузовной деталью токопроводящего карбонизированного фрагмента;
- наглядно проиллюстрировать, что расчетная формула для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания по ГОСТ 12.1.004–91[1], соответствует экспериментальным данным моделирования короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В;
- показать, что процессы, происходящие в медном проводнике при коротком замыкании, приводят к изменению его структуры;
- экспериментально доказать, что изменение структуры медного проводника при коротком замыкании может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, а также на микротвердомере DuraScan 20. Для измерения температуры проводника в процессе короткого замыкания применялся тепловизор Fluke Ti400. Испытаниям подвергались образцы многопроволочных проводников сечением от 1,5 до 4,9 мм^2. Короткое замыкание моделировалось на учебной установке, включающей двигатель ВАЗ-21083 с тормозной машиной (рис. 1, *a*). Двигатель оснащен аккумуляторной батареей 6СТ62 и генератором ВАЗ-2108-2115, 2170 14В 80А КЗАТЭ.

a



b

Рис. 1. Общий вид: *a* — экспериментальная установка; *b* — образец медного проводника для определения микротвердости

Fig. 1. The overview: *a* — an experimental unit; *b* — a copper conductor sample designated for microhardness testing

Кузовную деталь автомобиля имитировала стальная лента размером 52 × 20 × 0,8 мм. К отрицательному выводу аккумуляторной батареи посредством многопроволочного медного провода подключалась стальная лента, а к положительному — провод, замыкающий накоротко электрическую цепь. Для определения параметров микротвердости были изготовлены аншлифы медных проволочек (рис. 1, *b*). Все образцы запрессовывались в фенольную смолу с наполнителем из древесной муки с массовой долей золы до 1 % и подвергались шлифовке, при этом многопроволочные проводники разделялись на отдельные проволочки (см. рис. 1, *b*). Измерения выполнялись с соблюдением общих требований ГОСТ 9450–76[2].

[1] ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14 июня 1991 г. № 875.

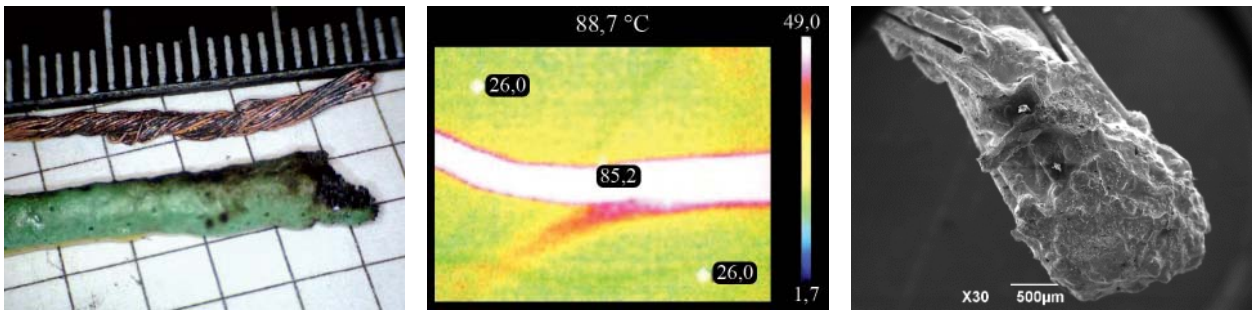
[2] ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09 января 1976 г. № 68.

Результаты и их обсуждение

В работе [27] экспериментально доказано, что если между кузовной деталью автомобиля и проводником имеется воздушный зазор, равный толщине изоляции этого проводника, то короткого замыкания не произойдет. Авторами [28] при анализе причин пожаров автотранспортных средств дана ссылка на закон Пашена, согласно которому электрическая дуга при обычном атмосферном давлении и напряжении 12 В возникнуть не может. В частности, в работе [28] отмечается, что закон Пашена описывает взаимосвязь между напряжением и образованием устойчивой электрической дуги при условии наличия достаточного тока при сближении двух электродов. В неионизированном воздухе и при комнатной температуре это минимальное напряжение, необходимое для образования дуги, также называемое напряжением пробоя, рассчитано как 340 В для зазора размером 0,007 мм (0,00027 дюйма) [28]. Таким образом, первичное короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В может протекать только в искровом режиме при контакте оголенного медного проводника с очищенной от лакокрасочного покрытия кузовной деталью.

Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания приведены на рис. 2, 3. При этом необходимо отметить, что в промежутке времени от 1 до 4 с искрового короткого замыкания температура изоляции проводника не превышает 88,7 °С, и она не воспламеняется (рис. 2, *a*). Обугливание изоляции отмечается только непосредственно в области короткого замыкания. Температура самого медного проводника в указанный интервал времени в зоне искрения не превышает 192,5 °С.

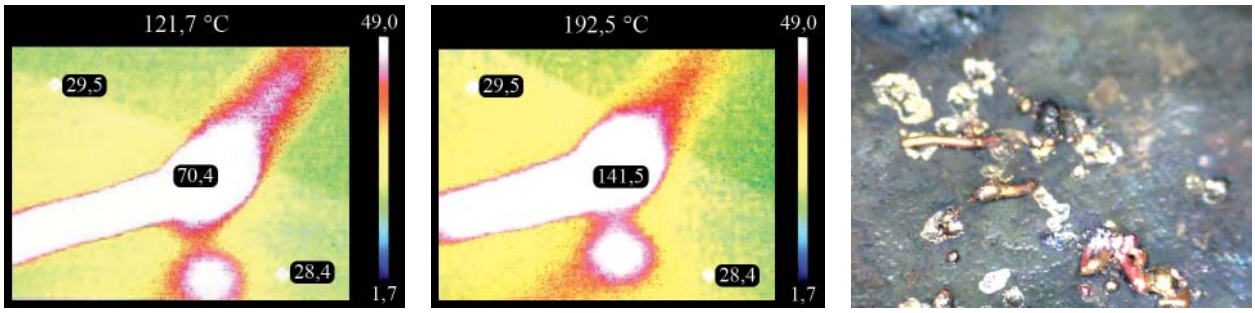
Эксперимент также подтвердил вывод авторов [29], согласно которому короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания. При этом процесс самоликвидации протекает в двух формах: в первом случае, как показано в работе [27], в непосредственной близости от места залипания по терминологии [7] происходило разрушение проволок медного проводника с характерными признаками токовой перегрузки; во втором случае проволоки разрушались в месте



a *b* *c*

Рис. 2. Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания: *a* — состояние изоляционного покрытия проводника; *b* — температура проводника; *c* — оплавление медного многопроволочного проводника, увеличение 30^X

Fig. 2. Short circuit imitation experiment results: *a* — the condition of the conductor insulation; *b* — conductor temperature; *c* — multiwire copper conductor melting, 30^X magnification



a *b* *c*

Рис. 3. Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания: *a* — температура проводника на третьей секунде эксперимента; *b* — температура проводника на четвертой секунде эксперимента; *c* — разрушение проволочек в области контакта

Fig. 3. Short circuit imitation experiment results: *a* — the conductor temperature during the third second of the experiment; *b* — the conductor temperature during the fourth second of the experiment; *c* — wire destruction in the contact area

контакта (рис. 3, *c*). Поскольку подача медной проволоки в зону короткого замыкания не происходит, то оно самоликвидируется. Следует отметить, что, несмотря на высокую температуру искры, ее воспламеняющая способность сравнительно невысока, так как из-за малых размеров (массы) запас тепловой энергии искры очень мал. Искры способны воспламенить парогазовоздушные смеси, имеющие малый период индукции, небольшую минимальную энергию зажигания и отсутствующие в технически исправном автомобиле. Необходимо напомнить, что ГОСТ 12.1.004–91 рекомендует для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания, следующую формулу:

$$t_{пр} = t_{н} + \frac{I_{к.з}^2 R \tau_{к.з}}{C_{пр} m_{пр}}, \quad (1)$$

где $t_{н}$ — начальная температура проводника, °С;

$I_{к.з}$ — ток короткого замыкания, А;

R — сопротивление проводника, Ом;

$\tau_{к.з}$ — время короткого замыкания, с;

$C_{пр}$— теплоемкость проводника, Дж/(кг·К);

$m_{пр}$ — масса проводника, кг.

В свою очередь, сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = \rho l / s, \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом · м^2;

l — длина проводника, м;

S — площадь поперечного сечения проводника, м^2.

Следует указать, что в интервале величины тока короткого замыкания 60…100 А расчет по формуле дает результаты, близкие к экспериментальным. В качестве массы проводника необходимо принимать массу жгута проводов, в котором произошло короткое замыкание. В свою очередь, длина проводника равна длине жгута проводов, в котором произошло короткое замыкание. Нижняя граница интервала тока короткого замыкания обоснована в работе [7], верхняя граница определяется конструктивными параметрами легковых автомобилей. Необходимо отметить, что у всех современных легковых автомобилей в электрической цепи сразу за аккумуляторной батареей (АКБ) имеется силовой предохранитель номиналом 120…250 А в зависимости от емкости АКБ. Далее, в блоке предохранителей моторного отсека имеется силовой предохранитель типа ALT номиналом 60…100 А в зависимости от конструкции автомобиля. Таким образом, в электрических цепях за блоком предохранителей моторного отсека сила тока конструктивно не может превышать 100 А. Формула (1) может использоваться для проверочного расчета при обосновании версии о причастности того или иного жгута проводов к возникновению пожара автомобиля.

Ряд авторов [28], в том числе специалисты АО «АВТОВАЗ», встречали в своей практике сквозные повреждения деталей кузова автомобиля, обусловленные электродуговым процессом. Авторами [28] даны следующие варианты возникновения дуги. Первый вариант основан на стандарте NFPA®921[3], в котором дается следующее объяснение возникновения дуги: «Изоляция проводов при воздействии прямого пламени или лучистого тепла может быть обуглена и начнет действовать, как полупроводящая среда», т.е. карбонизированный токопроводящий элемент замыкает цепь и вызывает дугу. Второй вариант отсылает к исследованию, проведенному Научно-исследовательским институтом пожарных автомобилей. Согласно этому исследованию, в изоляции жгута проводов под действием электрического тока происходит трансформация углеводородов в углерод, который является хорошим проводником. По прошествии значительного времени (например, 10–15 лет эксплуатации автомобиля) этот нагар может увеличиться в такой степени, что не станет способен проводить большой ток, который и вызовет электродуговой процесс [28]. Авторами работы [28] также отмечается, что продолжительность дуги в цепи постоянного тока зависит от подачи питания и зазора в контакте, поскольку дуга имеет тенденцию быстро разрушать металлические электроды, увеличивая зазор, который гасит дугу.

Для имитации такого режима дуги в рамках настоящего исследования в зазор между многопроволочным медным проводником и металлической пластиной, имитирующей кузовную деталь, был помещен фрагмент угольнографитовой щетки электродвигателя. В связи с этим необходимо напомнить, что известна дуговая сварка угольным электродом или способ Бенардоса, который принципиально отличается от сварки металлическим электродом. При дуговой сварке угольным электродом дуга горит между свариваемыми элементами и электродом. Электрод в этом случае является только проводником электричества, присадочный же металл по мере надобности вводится в сварочную ванну дополнительно. Сварку меди угольной дугой выполняют только с применением постоянного тока на прямой полярности (положительный полюс машины присоединяется к изделию, а отрицательный — к электроду). Сварка меди угольной дугой на обратной полярности не выполняется, так как в этом случае дуга горит неустойчиво и происходит быстрое сгорание угольного (графитового) электрода.

Результаты эксперимента приведены на рис. 4. На второй секунде возникновения дуги температура проводника достигла 201,6 °С, от токовой перегрузки начала плавиться изоляция одновременно

[3] NFPA®921. Guide for fire and explosion investigations.

a *b* *c*

Рис. 4. Результаты эксперимента по моделированию электрической дуги: *a* — температура проводника; *b* — кратер на контактной поверхности, увеличение 5^X; *c* — кратер, увеличение 30^X

Fig. 4. Results of an electric arc modeling experiment: *a* — conductor temperature; *b* — contact surface crater, 5^X magnification; *c* — crater, 30^X magnification

на всем протяжении проводника. Поскольку фрагмент угольнографитовой щетки электродвигателя имел размеры, сопоставимые с сечением проводника, то на третьей секунде он полностью выгорел, и дуга исчезла. На поверхности металлической пластины отмечается кратер с дуговыми наплывами металла и трещиной на дне (рис. 4, *b*, *c*). Необходимо отметить, что при искровом протекании короткого замыкания также может появляться кратер, но дуговые наплывы в нем не образуются [27].

Таким образом, поскольку у автомобильной электрической сети имеется обратная полярность, то вторичное короткое замыкание, сопровождаемое дугой, кратковременно и самоликвидируется в процессе выгорания карбонизированного токопроводящего фрагмента, переходя в искровую стадию.

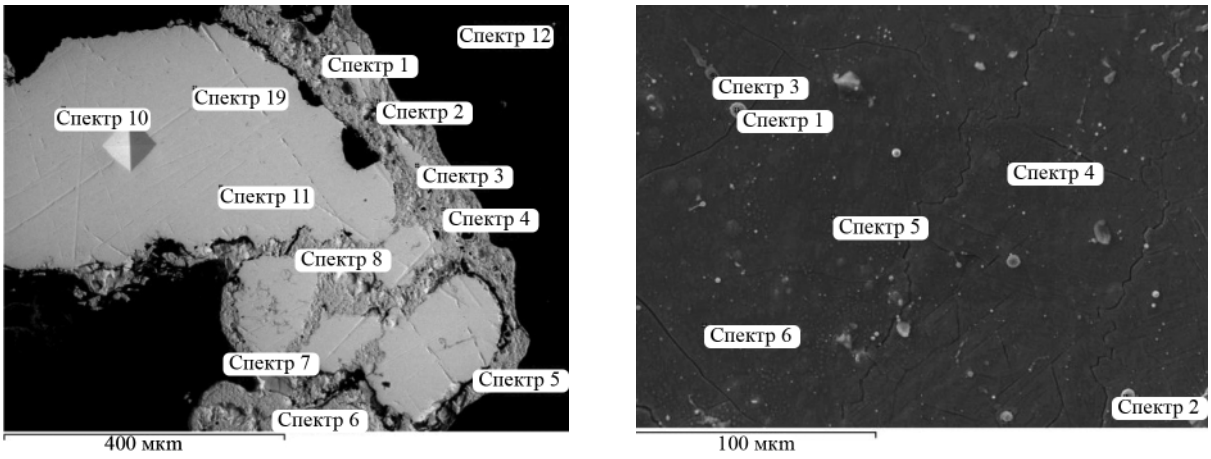
На рис. 5 приведены результаты измерения микротвердости многопроволочных медных проводников, оплавленных в результате короткого замыкания.

Согласно справочным данным, микротвердость исходного образца твердой холоднокатаной электротехнической меди М1Е составляет около 95 МПа. В областях сплавления проволок проводника микротвердость снижается до уровня HV54,5, в непосредственной близости от зон сплавления микротвердость близка к начальному уровню HV95,8, а на удалении около 1 см от зоны оплавления микротвердость проволочек повышается и может достигать значения HV113 (см. рис. 5). Снижение микротвердости в области сплавления проволок объясняется наличием пор и раковин, увеличение же микротвердости вызвано двумя одновременно действующими факторами. Во-первых, в работе [30] указывается, что значительное (до 2,0…3,2 ГПа) увеличение микротвердости является результатом механического легирования меди кислородом на этапе механической активации с образованием частиц оксидов и результирующим подавлением явления динамической рекристаллизации и других процессов релаксации, формирующихся при деформации высокодефектных наноструктурных состояний. Во-вторых, в работе [31] установлено, что, независимо от исследованных значений индукции магнитного поля после удаления из него образца, микротвердость увеличивается на величину, зависящую от времени выдержки и индукции магнитного поля. Таким образом, увеличение микротвердости является одним из характерных признаков короткого замыкания.

a *b* *c*

Рис. 5. Результаты измерения микротвердости: *a* — на участке сплавления проволок; *b* — на участке вблизи сплавления проволок; *c* — на участке, удаленном от оплавления медного многопроволочного проводника

Fig. 5. Microhardness testing results: *a* — in the wire fusion area; *b* — in the area adjacent to the wire fusion; *c* — at a distance from the multiwire copper conductor melting area



a *b*

Рис. 6. Точки проведения энергодисперсионного анализа: *a* — участок оплавления многопроволочного медного проводника; *b* — дно кратера на контактной поверхности

Fig. 6. Energy dispersive analysis points: *a* — multiwire copper conductor melting area; *b* — crater bottom on the contact surface

На рис. 6 показаны точки проведения энергодисперсионного анализа зоны оплавления медного многопроволочного проводника (рис. 6, *a*) и дна кратера, образованного дугой (рис. 6, *b*).

В табл. 1 и 2 приведены результаты энергодисперсионного анализа. Из данных табл. 1 следует, что на участках оплавления и сплавления проволок многопроволочного проводника (точки измерения 1–8) содержание кислорода изменяется в диапазоне 14,27…20,67 %. На неповрежденных участках (точки измерения 9–11) содержание кислорода составляет 6,38…11,05 %, что подтверждает данные работы [30] и свидетельствует об изменении структуры меди. Наличие железа предполагает массоперенос при протекании процесса короткого замыкания. Присутствие Mg, Si, Ca объясняется переносом материала при шлифовке образца.

Из данных табл. 2 следует, что поверхность кратера покрыта конденсировавшимися частицами паров меди, образовавшимися при имитации дугового процесса с угольнографитовым электродом. Из сравнения рис. 3, *c* и рис. 6, *b* следует вывод о криминалистически значимом признаке, позволяющем различать искровое и дуговое протекание короткого замыкания.

Таблица 1. Результаты микроанализа участка, показанного на рис. 6, *a*

Table 1. The microanalysis of the area shown in Fig. 6, *a*

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, mass percent						
	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu	Ca
Спектр 1 / Range 1	14,27	—	—	—	1,40	82,75	1,58
Спектр 2 / Range 2	16,76	—	—	0,66	0,90	80,12	1,56
Спектр 3 / Range 3	14,23	—	0,95	—	—	82,50	2,32
Спектр 4 / Range 4	17,89	—	—	0,96	1.63	76,54	2,97
Спектр 5 / Range 5	20,18	—	—	—	2,00	75,06	2,76
Спектр 6 / Range 6	20,67	—	—	—	—	77,60	1,73
Спектр 7 / Range 7	18,50	—	—	—	—	80,20	1,30
Спектр 8 / Range 8	16,52	—	—	—	—	80,74	2,74
Спектр 9 / Range 9	6,95	—	—	—	—	92,13	0,92
Спектр 10 / Range 10	6,38	—	—	—	—	92,60	1,02
Спектр 11 / Range 11	11,05	—	—	—	—	87,23	1,72
Спектр 12 / Range 12	70,18	1,65	—	2,35	—	9,34	14,25

Таблица 2. Результаты микроанализа участка, показанного на рис. 6, *b*
Table 2. The microanalysis of the area shown in Fig. 6, *b*

Точки измерения / Measurement points	Содержание химического элемента, % мас. / Chemical element content, mass percent			
	O	Cl	Fe	Cu
Спектр 1 / Range 1	7,52	0,94	76,71	14,84
Спектр 2 / Range 2	31,03	0,63	52,50	15,84
Спектр 3 / Range 3	8,90	—	86,34	4,76
Спектр 4 / Range 4	23,83	—	74,38	1,79
Спектр 5 / Range 5	24,30	0,62	73,28	1,80
Спектр 6 / Range 6	25,26	0,67	71,25	2,81

Выводы

Экспериментально подтверждено, что короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) в автомобильной электрической сети напряжением 12 В самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания.

Наглядно показано, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В протекает в искровом режиме и полностью соответствует закону Пашена.

Опытным путем доказано, что возникновение дуги при коротком замыкании в автомобильной электрической сети напряжением 12 В возможно только при наличии между проводником и кузовной деталью токопроводящего карбонизированного фрагмента, что соответствует вторичному короткому замыканию.

Наглядно проиллюстрировано, что расчетная формула для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания, по ГОСТ 12.1.004–91 дает результаты, близкие к экспериментальным данным моделирования короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В.

Показано, что процессы, происходящие в медном проводнике при коротком замыкании, приводят к изменению его структуры, что может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости.

Продемонстрировано, что метод измерения микротвердости может быть использован при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии.

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых из сгоревших транспортных средств в целях установления причины пожара, что позволит разработать профилактические мероприятия или технические решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В.* Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88
2. *Quintiere J.G.* Fundamentals of fire phenomena. England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. *Beyler C., Carpenter D., Dinenno P.* Introduction to fire modeling // Fire Protection Handbook. 20th ed. Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. *Severy D.M., Blaisdell D.M., Kerkhoff J.F.* Automotive collision fires // SAE Technical Paper. 1974. DOI: 10.4271/741180
5. *Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura et al.* Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44. No. 3. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
6. *Чешко И.Д., Скодтаев С.В., Теплякова Т.Д.* Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 1 (49). С. 107–115.
7. *Богатищев А.И.* Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. 269 с.

8. *Чешко И.Д.* Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). 2-е изд., стереотип. СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. 562 с.
9. *Чешко И.Д., Мокряк А.Ю., Скодтаев С.В.* Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2015. № 1. С. 41–46. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V71/7.pdf
10. *Мокряк А.Ю.* Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. 140 с.
11. *Скодтаев С.В.* Механизм и морфологические признаки аварийных пожароопасных процессов в электросетях автомобилей : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 144 с.
12. *Смелков Г.И., Чешко И.Д., Плотников В.Г.* Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 3. С. 121–128. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00016
13. *Недобитков А.И.* Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 2. С. 17–25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25
14. *Чешко И.Д., Мокряк А.Ю., Мокряк А.В.* Эволюция методики определения первичности-вторичности оплавлений медных проводников, вызванных коротким замыканием // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 3. С. 39–45. DOI: 10.24411/2218-130X-2018-00047
15. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. 1983. Vol. 19. No. 3. Pp. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698
16. *Wright S.A., Loud J.D., Blanchard R.A*. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? // Fire Technology. 2015. Vol. 51. No. 5. Pp. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9
17. *Babrauskas V.* Arc mapping: a critical review // Fire Technology. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
18. *Hoffmann D.J., Swonder E.M., Burr M.T.* Arc faulting in household appliances subjected to a fire test // Fire Technology. 2016. Vol. 52. Issue 6. Pp. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0
19. *Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou.* Microstructural study on oxygen permeated arc beads // Journal of Nanomaterials. 2015. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2015/373861
20. *Murray I., Ajersch F.* New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials ‘2009. London, Interscience Communications Ltd., 2009. Pp. 857–869.
21. *Carey N.J.* Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
22. *Смелков Г.И.* Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 327 с.
23. *Lewis K.H., Templeton B.* Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating // Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology. Sarasota : National Association of Fire Investigators, 2008. Pp. 183–195.
24. *Сысоева Т.П., Моторыгин Ю.Д.* Особенности расположения дендритных структур в оплавлениях медных проводников на транспортных средствах // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4. С. 34–41.
25. *Roby R.J., McAllister J.* Final technical report for award No. 2010-DN-BX-K246: Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012. URL: https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/239052.pdf
26. *Таубкин И.С., Саклантий А.Р.* О методических материалах по установлению причинно-следственной связи между аварийными режимами в электропроводке с медными проводниками и возникновением пожара // Теория и практика судебной экспертизы. 2018. Т. 13. № 3. С. 38–46. DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46
27. *Недобитков А.И.* Особенности короткого замыкания в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 5. С. 34–49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49
28. *Parrott K.D., Stahl D.R.* Electrical arcs and sparks: A literature review of definitions and their implications in the analysis of 12 volt direct current electrical system fires // International

Symposium on Fire Investigation Science & Technology (ISFI), 2014. URL: https://es.stahl-engineering.com/post/electrical-arcs-and-sparks-12-volt-direct-current-electrical-system-fires
29. *Исхаков Х.И., Пахомов А.В., Каминский Я.Н.* Пожарная безопасность автомобиля. М. : Транспорт, 1987. 87 с.
30. *Дитенберг И.А., Денисов К.И., Тюменцев А.Н., Корчагин М.А., Корзников А.В.* Особенности микроструктуры и закономерности упрочнения меди при механической активации и кручении на наковальнях Бриджмена // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 6. С. 81–87.
31. *Загуляев Д.В., Ярополова Н.Г., Комиссарова И.А., Коновалов С.В., Громов В.Е.* Закономерности изменения микротвердости меди после магнитной обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 2. С. 261–265. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18910335

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI:10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus.).
2. Quintiere J.G. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Beyler C., Carpenter D., Dinenno P. Introduction to fire modeling. *Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. Severy D.M., Blaisdell D.M., Kerkhoff J.F. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper.* 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura et al. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(3):301-310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
6. Cheshko I.D., Skodtayev S.V., Teplyakova T.D. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2019; 1(49):107-115. (rus.).
7. Bogatishchev A.I. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2002; 269. (rus.).
8. Cheshko I.D. *Examination of fire (objects, methods, methods of research).* Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation, 1997; 562. (rus.).
9. Cheshko I.D., Mokryak A.Yu., Skodtaev S.V. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2015; 1:41-46. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V71/7.pdf (rus.).
10. Mokryak A.Yu. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2018; 140. (rus.).
11. Skodtaev S.V. *Mechanism and morphological features of emergency fire-dangerous processes in electric networks of cars : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia, 2019; 144. (rus.).
12. Smelkov G.I., Czeshko I.D., Plotnikov V.G. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2017; 3:121-128. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00016 (rus.).
13. Nedobitkov A.I. Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(2):17-25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25 (rus.).
14. Cheshko I.D., Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Evolution of the methodology of distinguishing “victim” from “cause” beads of copper conductors by short circuit. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii.* 2018; 3:39-45. DOI: 10.24411/2218-130x-2018-00047 (rus.).
15. Delplace M., Vos E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*. 1983; 19(3):185-191. DOI: 10.1007/bf02378698
16. Wright S.A., Loud J.D., Blanchard R.A. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? *Fire Technology*. 2015; 51(5):1051-1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9
17. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5

18. Hoffmann D.J., Swonder E.M., Burr M.T. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test. *Fire Technology*. 2016; 52(6):1659-1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0
19. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads. *Journal of Nanomaterials*. 2015; 1-8. DOI: 10.1155/2015/373861
20. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation. *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009; 857-869.
21. Carey N.J. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping* : Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
22. Smelkov G.I. *Fire safety of wirings.* Moscow, Cable LLC Publ., 2009; 328. (rus.).
23. Lewis K.H., Templeton B. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008; 183-195.
24. Sysoyeva T.P., Motorygin Yu.D. Particular of arrangement of fir-tree structures in fusion of copper conductors at transport vehicles. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2014; 4(32):34-41. (rus.).
25. Roby R.J., McAllister J. *Final technical report for Award No. 2010-DN-BX-K246* : *Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012. URL: https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/239052.pdf
26. Taubkin I.S., Saklantiy A.R. Methodological resources for investigating the failure status of electrical wiring with copper conductors as the cause of fire. *Theory and Practice of Forensic Science.* 2018; 13(3):38-46. (rus.). DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46.
27. Nedobitkov A.I. Specific features of short circuit in automobile electrical system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(5):34-49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49 (rus.).
28. Parrott K.D., Stahl D.R. Electrical arcs and sparks: A literature review of definitions and their implications in the analysis of 12 volt direct current electrical system fires. *International Symposium on Fire Investigation Science & Technology* (ISFI), 2014. URL: https://es.stahl-engineering.com/post/electrical-arcs-and-sparks-12-volt-direct-current-electrical-system-fires
29. Iskhakov Kh.I., Pakhomov A.V., Kaminsky Ya.N. *Fire safety of the car*. Moscow, Transport Publ., 1987; 87. (rus.).
30. Ditenberg I.A., Denisov K.I., Tyumentsev A.N., Korchagin M.A., Korznikov A.V. Microstructural percularities of copper and mechanisms of its hardening after mechanical activation and torsion in Bridgman anvils. *Physical mesomechanics*. 2013; 16(6):81-87. (rus.).
31. Zagulyaev D.V., Yaropolova N.G., Komissarova I.A., Konovalov S.V., Gromov V.E. Regularities of microhardness copper change after magnetic treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia/Basic Problems of Material Science (BPMS).* 2013; 10(2):261-265. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18910335 (rus.).

Поступила 21.09.2020, после доработки 20.10.2020;
принята к публикации 28.10.2020
Received September 21, 2020; Received in revised form October 20, 2020;
Accepted October 28, 2020

Информация об авторе

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Information about the author

Alexandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.61-74
УДК 681.5
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов

© **И.В. Самарин** ✉, **А.В. Крючков, А.Ю. Строгонов**

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1)

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечена важность проведения мероприятий по обеспечению пожарной безопасности (ПБ) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), в частности, при течении непрерывных технологических процессов нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Благодаря специальному программному обеспечению в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами лица, принимающие решения, способны управлять процессами планирования и выполнения данных мероприятий. В качестве объекта исследования выбрана подсистема предупреждения пожаров и взрывов для управления процессами контроля газоанализирующего оборудования.

Теоретические основы. Процесс обеспечения ПБ на объектах нефтепереработки, составной частью которого является процесс технического обслуживания датчиков газоанализаторов, характеризуется такими случайными подпроцессами, как климатические и погодные изменения на объекте. Данный процесс предлагается разбить на два встречных подпроцесса: разрушительный и созидательный. События, связанные с проведением калибровки, поверки или замены чувствительных элементов в термохимических датчиках (ТХД), составляют суть восстановительного подпроцесса. События разрушительного подпроцесса связаны с появлением регистрируемых дежурной сменой сведений об отклонении в работе ТХД от нормированных значений. Случайность этого подпроцесса предлагается описать марковским процессом. Поведение системы датчиков моделируется в виде двух потоков. ТХД имеют два состояния: готов или не готов.

Результаты исследования. Модель готовности газоанализаторов рассчитана как отношение числа потенциально готовых к использованию в соответствии с нормативно-технической документацией ТХД к их общему числу с учетом случайности событий, которые выводят ТХД из состояния готовности. Исследован частный случай, на примере которого проиллюстрирована схема построения марковской модели. Рассчитано возможное число состояний совокупности ТХД для такой ситуации. Динамика перехода между группами состояний в совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре определяется предлагаемой системой дифференциальных уравнений Колмогорова, которая для частного случая представлена пятью равенствами. Выполненный расчет может быть обобщен на любое количество выносных датчиков.

Выводы. Рассмотрен способ оценки готовности к использованию ТХД газоанализаторов на открытых площадках НПЗ. Метод может быть применен в процессе функционирования автоматизированной системы предотвращения пожаров и взрывов.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс; нефтеперерабатывающий завод; автоматизированная система управления технологическими процессами; пожарная безопасность; термохимический датчик; открытая площадка; техническое обслуживание; специальное программное обеспечение; цифровизация ТЭК; индустрия 4.0

Для цитирования: *Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 61–74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74

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

Thermochemical gas analyzer readiness assessment model

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

National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The importance of fire safety (FS) measures at fuel and energy industry facilities, in particular over the course of continuous technological processes of oil refineries (OR), is highlighted in the article. Decision makers are able to manage the process of planning and implementing these measures thanks to special software integrated into automated process control systems. The fire and explosion prevention subsystem designated for managing gas analyzing equipment and its control processes was chosen as the object of research.

Theoretical framework. The fire safety of oil refineries, that entails the maintenance of gas analyzer sensors, is characterized by such random subprocesses as climate and weather changes at refineries. It is proposed to split this process into two opposite subprocesses, destructive and productive ones. Events related to calibration, verification or replacement of sensitive elements of thermochemical sensors are at the core of the recovery subprocess. Destructive subprocess events are associated with the appearance of deviations in thermochemical sensors from nominal values as registered by a shift on duty. It is proposed to describe the randomness of this subprocess as a Markov process. The sensor system behavior is simulated as the two streams. Thermochemical sensors have two modes: ready and not ready.

Research results. The readiness model of gas analyzers is calculated as a ratio of the number of thermochemical sensors which are potentially ready for use in accordance with the regulatory and engineering documentation, to their total number, taking into account the randomness of events that make thermochemical sensors unready. A special case used to illustrate the Markov model building is studied. The possible number of modes for sets of thermochemical sensors is calculated for such a situation. The transition between modes of sets in a fire alarm subsystem is determined using the proposed system of differential Kolmogorov equations, which has five equations for a specific case. The calculation can be generalized for any number of remote sensors.

Conclusions. The readiness assessment method applied to thermochemical sensors of gas analyzers in open areas of refineries is studied. The method can be applied in the process of automated fire and explosion prevention system operation.

Keywords: fuel and energy industry; oil refinery; automated process control system; fire safety; thermochemical sensor; open area; maintenance; special software; digitization of the fuel and energy industry; industry 4.0

For citation: Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Strogonov A.Yu. Thermochemical gas analyzer readiness assessment model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):61-74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74 (rus).

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

Введение

Обеспечение требований пожарной безопасности (ПБ) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является одним из наиболее значимых вспомогательных технологических процессов. Мероприятия по обеспечению ПБ проводятся не только в соответствии с планами по линии ПБ, но и в случаях, когда встроенные средства контроля в оборудовании ПБ выдают сигналы об изменении его состояния. Например, на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в процессе разных технологических цепочек хранится и используется масса пожаровзрывоопасных продуктов и сырья, что, в свою очередь, создает существенную опасность возникновения крупных техногенных аварий и катастроф. Важно непрерывно совершенствовать методы предотвращения опасных ситуаций на протяжении всего технологического цикла НПЗ [1]. В работе рассматривается подход по оценке готовности термохимических датчиков (ТХД) газоанализаторов на открытых площадках НПЗ.

Планы обеспечения ПБ разрабатываются на основе параметров технологического оборудования и включены в состав систем стратегического планирования объекта. Принципы их разработки для проведения мониторинговых и иных мероприятий описаны в работах [2, 3]. Планы обеспечения ПБ оперативно контролируются дежурной сменой объекта, возглавляемой руководителем, — лицом, принимающим решение (ЛПР). Учитывая количество проводимых для этих целей мероприятий, как и их значимость для объекта НПЗ, в качестве вспомогательного инструмента ЛПР использует программное обеспечение (ПО), встроенное в автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) объекта [4]. В публикации [5] представлено обоснование необходимости непрерывной диагностики оборудования АСУТП, а также перечень мероприятий по предотвращению пожаров и взрывов. Следует отметить активный рост внедрения в производственные процессы систем виртуальных производств, средств поддержки управления «Индустрии 4.0» на объектах ТЭК, в том числе на НПЗ [6–8]. Однако рост числа объектов контроля, активное применение новых информационных технологий не снимают с ЛПР ответственности за принимаемые решения. Принятие решений при управлении объектом остается за ЛПР.

Объединение ряда систем контроля ПБ в единую автоматизированную систему принято рассматривать как автоматизированную систему пожаровзрывобезопасности (АСПВБ), описанную, в частности, в труде [9]. В ее состав входит подсистема предупреждения пожаров и взрывов. Ее используют, в том числе для управления процессами контроля газоанализирующего оборудования. В свою очередь, ее составной частью является подсистема оповещения о пожаре, работа которой организована на основе данных, получаемых от газоанализаторов.

При использовании датчиков газов необходима их подготовка к эксплуатации. Такая подготовка выполняется в ходе их технического обслуживания (ТО). Мероприятия по калибровке и поверке чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков проводят по поверочной газовой смеси (ПГС), для которой

существуют государственные стандартные образцы (ГСО). Их установка регламентирована[1].

Теоретические основы

На объектах НПЗ используются различные датчики газоанализаторов. Наиболее доступными с точки зрения цены являются термохимические датчики [10, 11]. Для них калибровка с установкой нуля и определением порогов превышения нижнего концентрационного предела распространения пламени (% НКПР) необходима гораздо чаще, чем для датчиков других типов. Они имеют в своем составе ЧЭ, устанавливаемый в выносном датчике (ВД), где требуется выполнять анализ, и блок сигнализации и питания, используемый ЛПР или ПО АСПВБ для регистрации событий. Мероприятия ТО, связанные с поверкой и калибровкой для датчиков конкретных типов, детально описаны в руководствах по эксплуатации (РЭ). Их проведение необходимо для подтверждения готовности ЧЭ.

Установленные стационарно на открытых установках ТХД подвержены влиянию окружающей среды [12]. Поэтому в процесс изменения их готовности включаются случайные подпроцессы, ни один из которых не может быть детерминированным в принципе. Это — климатические и погодные изменения [13], влияющие на объекты НПЗ. При этом характер изменения погодных условий, влияющих на состав реагента в ВД, серьезно отличается в различных регионах. Тем не менее с определенной вероятностью можно предполагать, что на дисциплину ТО, обеспечивающую надежную работу подсистемы оповещения о пожаре, группа этих параметров влияет одинаково.

Рассматривая процесс обеспечения ПБ, можно видеть, что он разбивается на два встречных подпроцесса — разрушительный и созидательный. Каждый из них состоит из событий. При этом каждое событие переводит отдельный ТХД в некоторое состояние.

Если события разрушительного подпроцесса по большей степени случайны, исключая плановые замены оборудования и моменты наступления необходимых регламентных работ, то события созидательного процесса всегда не случайны. Но случайный ход изменений в разрушительном подпроцессе, заставляя менять порядок обслуживания ВД ремонтной бригадой, привносит в созидательный подпроцесс элемент случайности.

События разрушительного подпроцесса при обеспечении надежной работы подсистемы оповещения о пожаре связаны с появлением регистрируемых дежурной сменой данных об отклонении в работе ВД от нормированных значений [14]. Такие отклонения могут быть вызваны разными обстоятельствами: необходимостью замены ЧЭ при незапланированном выходе его из строя, резкими изменениями влажности или температуры, приводящими к несоответствиям в показаниях % НКПР, реально регистрируемым ВД, и т.п. В этих случаях необходимы мероприятия по восстановлению устойчивой работы системы оповещения о пожаре, которые должна выполнить ремонтная бригада с применением ГСО-ПГС.

События, связанные с проведением калибровки, поверки или замены (в том числе незапланированной) ЧЭ в ВД, составляют суть восстановительного подпроцесса. Вопрос описания работы ремонтной бригады (дисциплины ТО) в условиях случайного выхода из строя отдельных ЧЭ связан с учетом событий, которые регистрируются случайным образом [15]. При этом процесс выхода из строя ЧЭ в случайном потоке разрушительного подпроцесса имеет такие вероятностные характеристики, которые зависят только от состояния ЧЭ в текущий момент времени. А так как нормированная надежность подсистемы оповещения о пожаре зависит только от текущего состояния конкретных датчиков и не зависит от того, как они оказались в таком состоянии, то эта случайная составляющая разрушительного процесса может быть описана марковским случайным процессом [16].

Рассуждая подобным образом, можно моделировать оба подпроцесса в обеспечении заданного уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре при помощи модели готовности ТХД, установленных вокруг открытой установки НПЗ. Рассчитав ее как отношение числа потенциально готовых к использованию в соответствии с нормативно-технической документацией ВД к их общему числу $N_{общ}$, можно моделировать поведение всей системы датчиков в виде двух потоков. Первый — разрушительный. Второй — созидательный. Аналогичные расчеты использовались в исследованиях [17, 18] для других целей при определении готовности пожарных автомобилей и пожарных сил и средств АСПВБ объектов ТЭК.

Будем считать, что ТХД имеют два состояния: готов или не готов. В первом случае все мероприятия калибровки, поверки и иные действия были с ним проведены, и он может быть использован как есть в течение срока $t_{м.\ кал}$. Будем также считать, что события, переводящие ТХД из состояния «готов» в состояние «не готов» не связаны с плановыми мероприятиями по их обслуживанию. Переходя к формулам, можно говорить, что:

[1] Требования к установке сигнализаторов и газоанализаторов (ТУ-газ-86). М., 1986. URL: https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9177/ (дата обращения: 16.08.2020).

$$N_{общ} = n_{гот} + n_{не\ гот}, \quad (1)$$

где $N_{общ}$ — общее количество датчиков на объекте;

$n_{гот}$ — количество датчиков в состоянии «готов»;

$n_{не\ гот}$ — количество датчиков в состоянии «не готов».

Учитывая опыт проведения оценок, в работе [18] для определения уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре, следует задать некоторую агрегированную цель. Ее достижение будет соответствовать некоторому количественному значению — критерию уровня, который можно считать агрегатным показателем качества нормированной надежности. Проиллюстрируем это на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что надежная работа каждого из ТХД, установленных вокруг открытой площадки НПЗ (и их совокупности), определяет критерий уровня готовности оборудования на первом уровне прохождения информации в подсистеме оповещения о пожаре. В свою очередь, во всей подсистеме оповещения о пожаре на НПЗ общий критерий определяется исходя из полученных сходным образом нескольких критериев для различных составных частей участков. Одной из таких частей на заданном участке НПЗ (на рис. 1 обозначен номером 2) является открытая площадка. Другой составной частью могут служить печи. Третьей — закрытые резервуары для хранения нефтепродуктов. Внося свой вклад в общую цель, готовность или неготовность каждого из ТХД, определяют значения показателя уровня надежности работы всей подсистемы. Каждому из уровней подсистемы оповещения о пожаре на НПЗ соответствует свой граф стратегического планирования [19], что позволяет агрегировать или уточнять показатели уровня готовности для каждого из элементов подсистемы.

Одним из вариантов определения значения показателя уровня готовности оборудования для определения нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре $\sigma^{(1)}_{над}$ может служить отношение, выражающее процент готовности к работе в ней используемых датчиков:

$$\sigma^{(1)}_{над} = \frac{n_{гот}}{n_{гот} + n_{не\ гот}} \cdot 100\ \%, \quad (2)$$

где $n_{гот}$ определяется исходя из действий ремонтной бригады, а $n_{не\ гот}$ формируется характеристиками математически случайного потока событий, моделирующего их последовательность в разрушительном подпроцессе.

Другой вариант $\sigma^{(2)}_{над}$ — процент не готовых датчиков:

$$\sigma^{(2)}_{над} = \frac{n_{не\ гот}}{n_{гот} + n_{не\ гот}} \cdot 100\ \%. \quad (3)$$

В обоих случаях возможно использование полученных выше формул для расчета. При этом максимальный уровень нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре будет обеспечен при $\sigma^{(1)}_{над} = 100\ \%$ и при $\sigma^{(2)}_{над} = 0$. Для реальных ус-

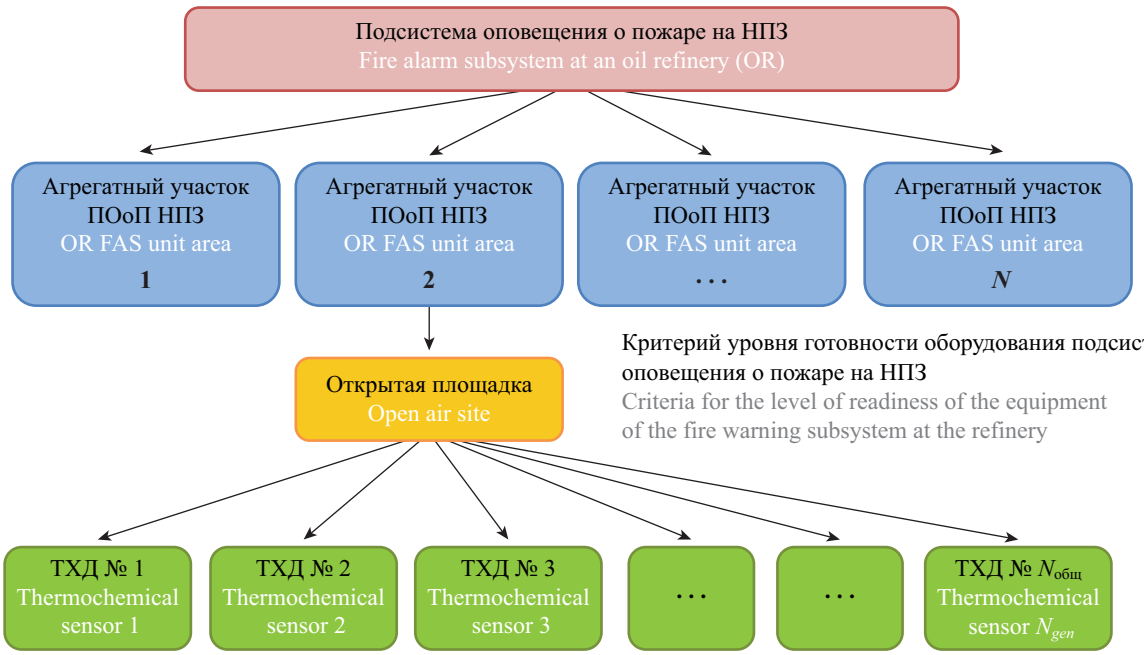


Рис. 1. Формирование агрегатной цели для критерия уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре (ПОоП)

Fig. 1. Formation of the aggregate goal for the level criterion of regulated reliability of a fire alarm subsystem (FAS)

ловий всегда возможны отклонения. Учитывая требования[1], такие отклонения крайне нежелательны, так как каждый из ВД контролирует значительную территорию вокруг открытой площадки. Поэтому следует предположить, что требуемый уровень готовности оборудования оповещения не должен превышать нескольких единиц (в датчиках).

Допустив, что в состав подсистемы оповещения о пожаре включено необходимое количество датчиков $N_{\text{общ}}$, будем рассматривать оборудование открытой площадки НПЗ в качестве единого целого. Составной ее частью, как было показано выше (рис. 1), является совокупность всех установленных вокруг нее ТХД.

Датчики, перешедшие в состояние «не готов», будут переводить всю их совокупность в определенное новое состояние. Если одновременно в состоянии «не готов» находится несколько датчиков с определенными номерами, то число возможных различных состояний в подсистеме оповещения о пожаре можно определить через число размещений из $N_{\text{общ}}$ элементов по $n_{\text{не гот}}$:

$$A_{N_{\text{общ}}}^{n_{\text{не гот}}} = \frac{N_{\text{общ}}!}{\left(N_{\text{общ}} - n_{\text{не гот}}\right)!}, \qquad (4)$$

а их общее число $S_{\text{общ}}^{(1)}$ будет:

$$S_{\text{общ}}^{(1)} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} A_{N_{\text{общ}}}^{i} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} \frac{N_{\text{общ}}!}{\left(N_{\text{общ}} - i\right)!}. \qquad (5)$$

Но если неважно, какие именно ВД перешли в состояние «не готов», а важно только их количество в состоянии «не готов», то число состояний определяется новой формулой:

$$C_{N_{\text{общ}}}^{n_{\text{не гот}}} = \frac{N_{\text{общ}}!}{n_{\text{не гот}}!\left(N_{\text{общ}} - n_{\text{не гот}}\right)!}. \qquad (6)$$

Общее число состояний совокупности ТХД $S_{\text{общ}}^{(2)}$ будет рассчитано, как:

$$S_{\text{общ}}^{(2)} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} C_{N_{\text{общ}}}^{i} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} \frac{N_{\text{общ}}!}{i!\left(N_{\text{общ}} - i\right)!}. \qquad (7)$$

Переход ВД в состояние «не готов» — составная часть разрушительного подпроцесса. Помимо запланированных, но пока не выполненных мероприятий поверки и калибровки (составных частей созидательного подпроцесса), на состояние ВД влияют погодные условия. Кроме того, на состояние ВД может иногда влиять изменение топологии объекта, которое может изменяться, если открытая площадка расположена на грунте. Обращая внимание на особенности применения математического аппарата теории случайных процессов марковского типа с дискретными состояниями при моделировании пожарных рисков в социотехнической системе [20], в данном случае $S_{\text{общ}}^{(2)}$ можем считать дискретной случайной величиной. Ее функция распределения показывает вероятность одного или нескольких возможных негативных событий. Интенсивность потока этих событий для каждого НПЗ своя.

Восстановительные работы при обходе ремонтной бригадой открытой площадки задают свой псевдослучайный поток событий. Псевдослучайным этот поток является в виду того, что многие мероприятия созидательного подпроцесса запланированы заранее и привязаны ко времени. Но поток случайных негативных событий приводит к корректировке этих планов, что вносит в поток восстановительных событий элемент случайности.

Исходя из логики работы бригады, нельзя говорить, что событие, соответствующее переходу из состояния «не готов» в состояние «готов» для отдельного ТХД может быть мгновенным. Однако регистрация данного события на пульте управления по окончании работы по калибровке или поверке может считаться мгновенной. Также мгновенной может считаться и регистрация перехода ТХД в состояние «не готов». Поэтому можно принять, что переходы между состояниями совокупности ТХД в случайных потоках событий разрушительного и созидательного подпроцессов происходят мгновенно.

Результаты исследования

Для получения общих формул рассмотрим сначала частный случай. На его примере покажем, как можно построить марковскую модель. Предположим, что сторона открытой площадки не превышает 30 м и по ее краю установлено 6 ВД, 3 из которых перешли в состояние «не готов» (рис. 2). На рисунке они обозначены контурно. Так как условный номер ВД в совокупности не имеет значения, как не имеет значения и то, какие ВД перешли в состояние «не го-

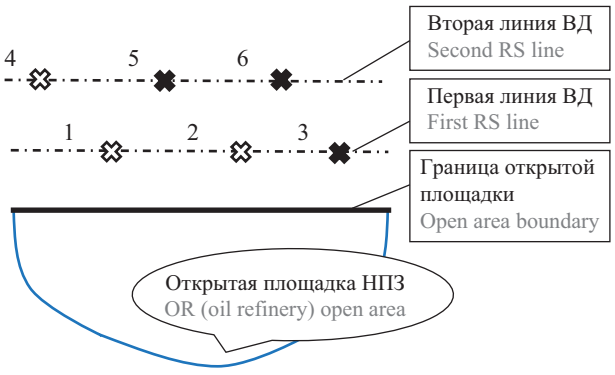


Рис. 2. Примерное расположение ВД (состояние совокупности ТХД)

Fig. 2. Approximate remote sensor (RS) location (a set of thermochemical sensors)

тов», то с точки зрения модели любые из указанных ВД могли стать не готовыми. Поэтому для расчета можно использовать формулу (6).

В указанном случае несоответствие заданному выше значению уровня нормативной надежности совокупности ТХД равно 50 %. И, значит, необходимо срочно восстанавливать совокупность ТХД или останавливать производственный процесс на данном производственном участке ввиду отсутствия требуемых средств контроля пожарной обстановки.

Рассчитаем возможное число состояний совокупности ТХД для такой ситуации. Примем, что установленные в первой линии ВД (рис. 2) являются началом отсчета и нумеруются слева направо. Тогда зафиксированная ситуация фиксирует, что неисправны ВД с номерами {1, 2, 4}. А, значит, вся их совокупность может содержать шесть (формула (6)) возможных состояний, которые можно записать в виде:

$$S_{124} = \left\{ s_{[124]},\ s_{[142]},\ s_{[214]},\ s_{[241]},\ s_{[412]},\ s_{[421]} \right\}. \quad (8)$$

Эти различные состояния совокупности ТХД соответствуют различному времени их перехода в состояние «не готов». Состояние $s_{[124]}$ означает, что первым в это состояние перешел ВД с номером 1, вторым — ВД с номером 2, третьим — ВД с номером 4. Другое состояние (вариант для расчета) данной совокупности ТХД с тремя ВД в состоянии «готов» из общего числа ТХД, равного шести, показано на рис. 3. Обозначения на нем такие же, как и на рис. 2.

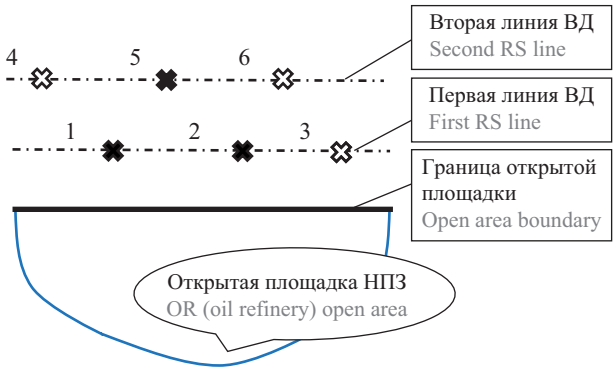


Рис. 3. Другое расположение ВД в состояниях «готов»/«не готов» (другое состояние совокупности ТХД)

Fig. 3. Alternative RS arrangement in ready/not ready modes (a different set of thermochemical sensors)

Ремонтная бригада будет стремиться сделать так, чтобы как можно меньше ВД оказывались в состоянии «не готов» одновременно. Но при этом ситуация с различными условиями эксплуатации и реалиями работы ремонтной бригады делает возможным возникновение таких состояний совокупности ТХД, при которых в какой-то момент времени в состоянии «не готов» окажутся все датчики или их произвольное число. Расчеты показывают, что, если не учитывать условный номер ВД (см. рис. 2, 3), общее число возможных состояний для всей совокупности ТХД в данном конкретном случае по выражению (7) будет равно 64.

В случае, когда датчики пронумерованы и имеет значение порядок их перехода в состояние «не готов», число таких состояний будет определяться формулой (5). Расчет показывает, что для данного конкретного случая это число равно 1957. Учитывая разницу в таких деталях, следует рассматривать состояния совокупности ТХД в данном случае в неупорядоченном виде, а варианты состояний совокупности ТХД, изображенные на рис. 2 и 3, а также все иные с такими же данными (3 ВД в состоянии «не готов», 3 ВД в состоянии «готов»), как одно состояние совокупности ТХД. Исходя из логики калибровки или поверки ВД по ГСО-ПГС, можно говорить, что состояния совокупности ТХД на рис. 2 и 3 — только варианты некоторой реальной ситуации. При этом, с точки зрения принятого выше правила о значении для расчета только количества ВД в состоянии «не готов», а не их номера в совокупности, оба состояния (рис. 2, 3) одинаковы для модели. В этом случае можно говорить о группе состояний, содержащей элементарные состояния совокупности ТХД (формула (8)). Чтобы отличать их друг от друга, будем далее называть различные состояния совокупности ТХД, где ВД пронумерованы «элементарным состоянием совокупности ТХД» или просто элементарным состоянием. А набор состояний совокупности ТХД, включающий в себя несколько вариантов ВД в состоянии «не готов» с одинаковым их количеством, «кластером состояний совокупности ТХД» или просто кластером состояний.

Для каждого из таких кластеров можно посчитать количество различных состояний совокупности ТХД, которые будут им соответствовать. Разбивая эти 64 состояния совокупности ТХД на кластеры состояний, можно посчитать по выражению (6) число состояний в зависимости от того, сколько ВД будут в состоянии «не готов». Занесем эти данные в табл. 1.

Кластер состояний № 4, к которому относятся оба состояния совокупности ТХД, показанные на рис. 4 и 5, содержит 20 состояний совокупности ТХД:

$$S_{124} = \left\{ \begin{array}{l} s_{[123]},\ s_{[124]},\ s_{[125]},\ s_{[126]},\ s_{[134]}, \\ s_{[135]},\ s_{[136]},\ s_{[145]},\ s_{[146]},\ s_{[156]} \\ s_{[234]},\ s_{[235]},\ s_{[236]},\ s_{[245]},\ s_{[246]}, \\ s_{[256]},\ s_{[345]},\ s_{[346]},\ s_{[356]},\ s_{[456]} \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Таблица 1. Виды и число состояний совокупности ТХД
Table 1. Types and number of sets of thermochemical sensors

Номер кластера состояний Mode cluster no.	Расшифровка состояния Mode description	Количество состояний совокупности ТХД Number of modes of sets of thermochemical sensors	Уровень нормативной надежности, % Standard reliability level, %
1	Все в состоянии «готов» / Every RS ready	1	100
2	«Не готов» 1 ВД / 1 RS not ready	6	83,33
3	2 ВД в состоянии «не готов» / 2 RS not ready	15	66,67
4	3 ВД в состоянии «не готов» / 3 RS not ready	20	50
5	4 ВД в состоянии «не готов» / 4 RS not ready	15	33,33
6	5 ВД в состоянии «не готов» / 5 RS not ready	6	16,67
7	Все ВД в состоянии «не готов» / Every RS not ready	1	0

Можно задать общий характер динамики изменения состояний как самих ВД, так и всей их совокупности, как функцию групп параметров. Приняв, что поток перехода каждого i-го ВД в состояние «не готов» ε_i есть функция ряда групп некоторых параметров, можно записать:

$$\varepsilon_i = \{\varepsilon_{1i},\ \varepsilon_{2i},\ \varepsilon_{3i}, \varepsilon_{4i}\}, \qquad (10)$$

где i — номер ВД;

ε_{1i} — специфические параметры данной модели ТХД;

ε_{2i} — параметры климата и топологии открытой площадки НПЗ;

ε_{3i} — параметры, связанные с ограничениями на работу персонала;

ε_{4i} — прочие параметры.

Первая группа параметров определяется нормативным временем проведения калибровочных и поверочных процедур по РЭ[2]. Данная группа значений детерминирована и связана только с конструктивными особенностями конкретного ТХД.

Вторая группа параметров связана с особенностями погодных условий и расположения открытой площадки НПЗ. В формировании их значений большую роль играет статистика наблюдений и вероятностные меры тех или иных особенностей конкретного НПЗ.

Третья группа параметров относится к внутренним процедурам, которые регламентируются на конкретном объекте организационно-распорядительной документацией (ОРД). Впрямую на интенсивность собственно отказов данные значения не влияют. Но косвенно значения этих параметров определяют, например, как часто закупается необходимое оборудование для проведения соответствующих работ. Это влияет на время, в течение которого отдельные ВД будут находиться в состоянии «не готов». В данную категорию «влияния» можно отнести события, связанные с человеческим фактором при проведении производственных операций [4]. Подобные события могут повлиять на состояние реагента ЧЭ. Данные значения также, как и предыдущая группа параметров, определяются статистическим путем.

Последняя группа параметров, которая влияет на интенсивность потока отказов, — это особенности основного производства, которые на конкретном НПЗ могут приводить к появлению агрессивных веществ или каталитических ядов.

Переход между кластерами состояний происходит в результате мгновенных событий разрушительного и созидательного процессов. Их моментальность обоснована выше. Иными словами, когда один из ВД совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре перешел в состояние «не готов» («планово» или по другой причине), совокупность ТХД переходит в другой кластер, если изменяется их число в состоянии «не готов». Последнее замечание важно, так как ремонтная бригада в тот же (или близкий к моменту регистрации данного события) момент времени может закончить перевод другого ВД в состояние «готов».

После попадания совокупности ТХД подсистемы предупреждения о пожаре на НПЗ в очередной кластер состояний, отличный от первого (табл. 1), следуют немедленные действия ремонтной бригады для восстановления работы совокупности ТХД НПЗ. Их действиями формируется дискретный поток ТО. Его интенсивность может определяться статистически.

[2] Сигнализаторы СТМ-10, Руководство по эксплуатации, Альбом приложений, АПИ2 840.069 РЭ1. URL: http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/bezopasnost_gazoanalizatory/stacionarnye_gazoanalizatory/signalizator_stm10/ (дата обращения: 22.08.2020).

Количество ВД вокруг открытой площадки НПЗ и порядок их перевода из состояния «не готов» в состояние «готов» определяет то, какие приоритеты необходимы ремонтной бригаде. При этом ей постоянно требуется сверка очереди проводимых мероприятий с состоянием остальных ТХД. Иногда, например, в случае появления незапланированных выбросов агрессивных веществ, ей следует с одного ТХД переключиться на другой. Попарное сравнение параметров значимости конкретного ТХД для всей системы оповещения о пожаре позволяет увидеть ТХД с максимальным приоритетом. Для каждого из них темп работы сотрудников бригады можно приравнять к некоторому значению v_i, где i — номер ТХД.

Для каждого конкретного состояния совокупности ТХД внутри одного из кластеров состояний можно посчитать интенсивность потока восстановления. Она будет определяться не только v_i, но и также тем, какие работы по восстановлению ВД были проведены до этого.

Наиболее очевидной причиной выбора приоритета в потоке восстановления ВД (перевода их из состояния «не готов» в состояние «готов») является положение ВД. ВД в первой линии необходимо обслуживать «скорее», чем ВД во второй и третьей. Поэтому данную причину следует рассматривать, как первую в общей структуре приоритетов работы ремонтной бригады.

Далее необходимо учитывать наличие ГСО-ПГС, возможность быстрой закупки требуемых заменяемых компонентов и расходных материалов, а также условия работы бригады и т.п. Примерные данные о таких приоритетах приведены в табл. 2.

Приоритеты задают интенсивность потока событий в созидательном подпроцессе. При этом для переходов между кластерами состояний в разрушительном подпроцессе можно утверждать, что их интенсивность ε_i точно не зависит от событий, случившихся при таком переходе ранее. Но в событиях созидательного подпроцесса совокупность ТХД в каждом конкретном элементарном состоянии может иметь свои особенности.

Поэтому приоритеты в нем для ремонтной бригады будут зависеть от событий и их интенсивности на предыдущем шаге ее деятельности. Учет переходов совокупности ТХД между кластерами ее состояний при проведении работ в восстановительном процессе можно определить в виде группы зависимостей следующего вида [21]:

$$\begin{cases} \nu_{i/ij} = \nu_i D_i^{(j)}; \\ \nu_{i/ijk} = \nu_i D_i^{(jk)}; \\ \nu_{i/ijkl} = \nu_i D_i^{(jkl)}, \\ \quad \ldots \\ \quad \text{и т.д.} \end{cases} \qquad (11)$$

где i — номер ВД;

v_i — интенсивность потока событий по переводу i-го ВД в состояние «готов»;

$v_{i/ij}$, $v_{i/ijk}$, $v_{i/ijkl}$ — интенсивность потока событий по переводу i-го ВД в состояние «готов» с учетом восстановления до этого ВД с номерами j, k и l соответственно;

$D_i^{(jk)}$ — приоритет перевода i-го ВД в состояние «готов» перед j-м и k-м ВД.

Моделирование переходов между кластерами состояний совокупности ТХД в разрушительном подпроцессе можно выполнить с помощью графа (см. рис. 4). Последние 3 кластера состояний

Таблица 2. Возможные приоритеты восстановления совокупности ТХД

Table 2. Possible recovery priorities of a set of thermochemical sensors

Номер приоритета Priority no.	Причина, обуславливающая выбор приоритета ремонтной бригадой The reason for its selection by the maintenance team
1	Работы по ВД в первой линии вокруг открытой площадки RS work within the first line surrounding the open area
2	Наличие ГСО-ПГС на НПЗ позволяет провести необходимые восстановительные работы The presence of State Standard Sample calibration gases at the OR allows for the necessary recovery work to be performed
3	Наличие заменяемых компонентов на НПЗ позволяет провести необходимые восстановительные работы (закупка не требуется) The availability of replaceable components at the OR allows for the necessary recovery work to be performed (no procurement required)
4	У ВД истекает срок поверки или калибровки / RS verification and calibration period is about to expire
5	У членов ремонтной бригады истекает срок разрешения на работу с данным оборудованием, требуются экзамены Members of the maintenance team have an expiring work permit for this equipment. Exams are to be taken

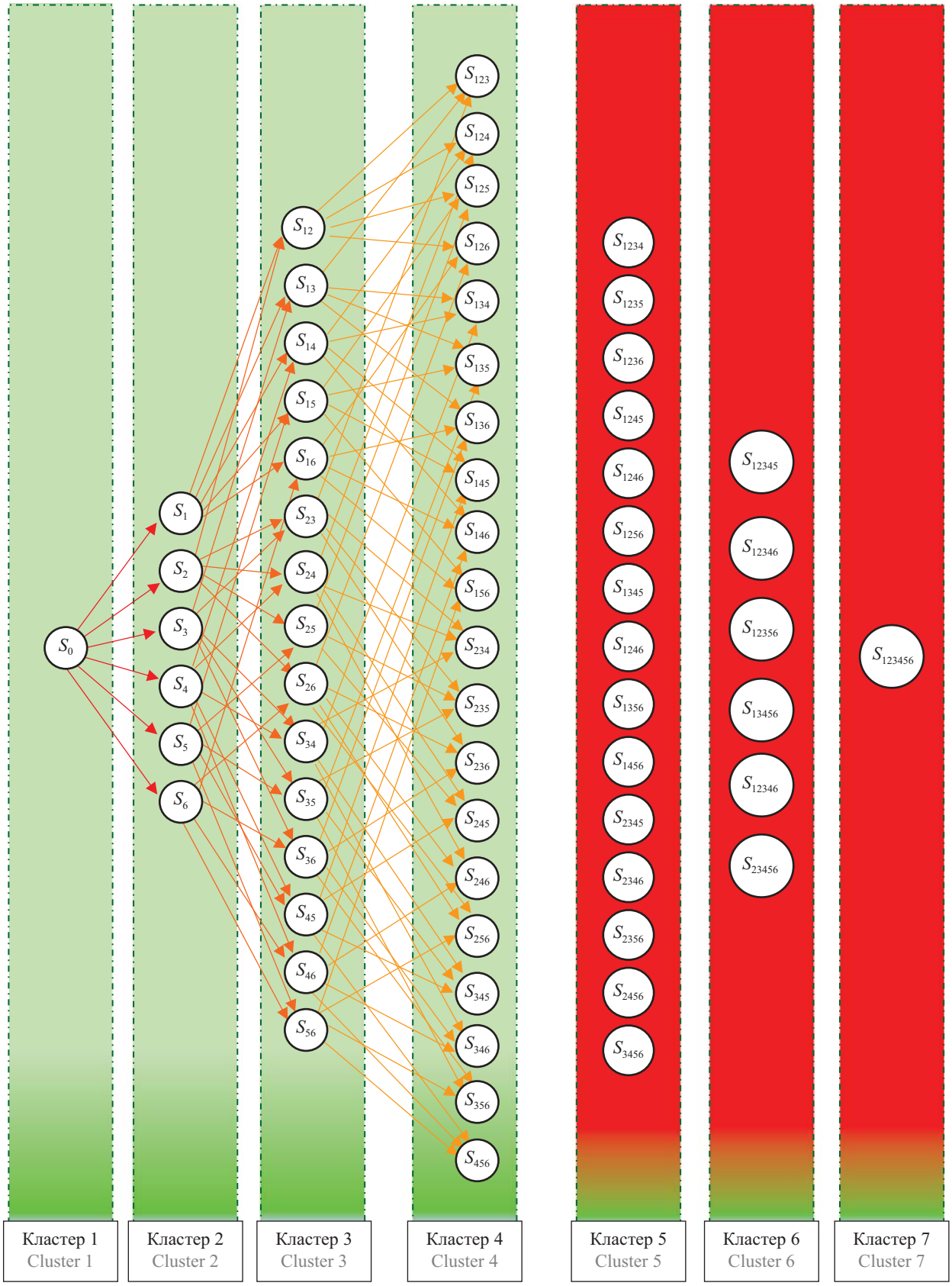


Рис. 4. Переходы совокупности ТХД между состояниями «готов» и «не готов» (при увеличении количества ВД в состоянии «не готов»)

Fig. 4. Transitions of sets of thermochemical sensors from/to ready and not ready modes (when the number of RS in the “not ready” mode increases)

ТХД рассматривать нецелесообразно ввиду низкого уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре. Интенсивность переходов между элементарными состояниями равна ε_i.

Обратный процесс может также быть представлен в виде графа (см. рис. 5). Кластеры состояний ТХД с номерами 5, 6, 7 из рассмотрения также исключены, так как уровень нормативной надежности подсистемы оповещения о пожаре в них ниже 50 %.

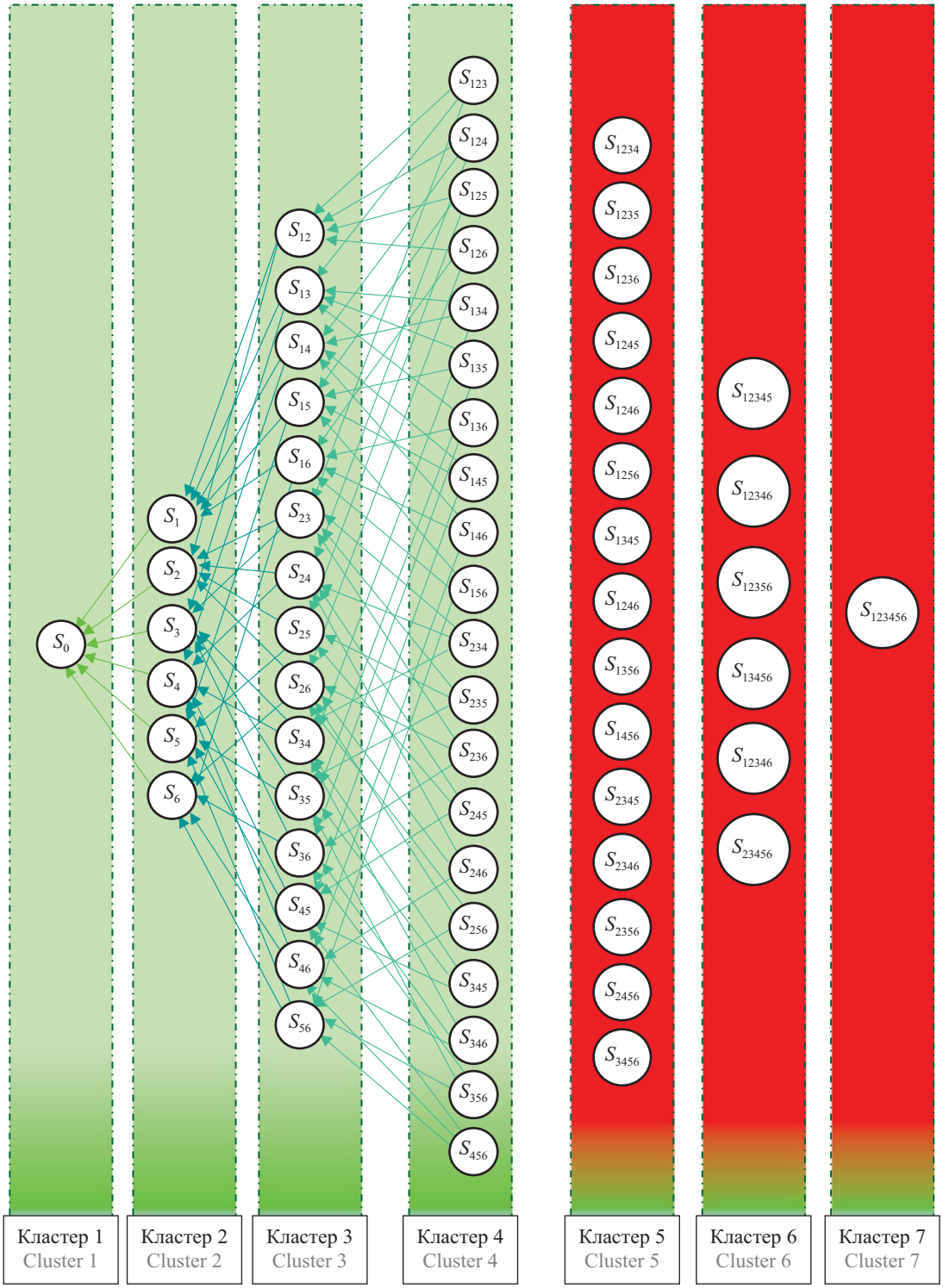


Рис. 5. Переходы совокупности ТХД между состояниями «не готов» и «готов» (при уменьшении количества ВД в состоянии «не готов»)

Fig. 5. Transitions of sets of thermochemical sensors from/to ready and not ready modes (when the number of RS in the “not ready” mode reduces)

Переходы между состояниями совокупности ТХД в созидательном подпроцессе имеют интенсивность $v_{i/ijk}$ в зависимости от номера предыдущего ВД, переведенного в состояние «готов». Ввиду большого объема информации часть весов в ориентированном графе не показана.

Исходя из представленных рассуждений, можно говорить о вероятностном векторе динамики изменения уровня нормативной надежности совокупности ТХД, установленных вокруг открытой площадки НПЗ, через кластеры состояний этой совокупности в подсистеме оповещения о пожаре в конкретный момент времени:

$$P(t) = \left\{ P_1(t),\ P_{ij}(t),\ P_{ijk}(t),\ P_{ijkl}(t),\ 0,\ 0,\ 0 \right\}, \quad (12)$$

с начальным состоянием:

$$P(0) = \left\{ P_1(0),\ P_{ij}(0),\ P_{ijk}(0),\ P_{ijkl}(0),\ 0,\ 0,\ 0 \right\}, \quad (13)$$

где $P_1(t)$, $P_{ij}(t)$, $P_{ijk}(t)$, $P_{ijkl}(t)$ — вероятности того, что совокупность ТХД подсистемы оповещения о пожаре на открытой площадке НПЗ находится в кластерах с номерами 1, 2, 3, 4 (соответственно, вероятность того, что уровень нормативной надежности данной составной части подсистемы будет равен, соответственно 100; 83,33; 66,67; 50 %).

Три последних нуля в формуле соответствуют возможным событиям в совокупности ТХД, при которых они переходят в элементарные состояния последних трех кластеров с недопустимым уровнем нормативной надежности. Предполагается, что ремонтная бригада должна работать так, чтобы не допустить снижения этого уровня ниже 50 %. Иными словами, совокупность ТХД никогда не перейдет в аварийные с точки зрения ПБ состояния.

Динамика перехода между кластерами состояний в совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре на открытой площадке НПЗ для обеспечения ее уровня нормативной надежности в пределах от 50 до 100 % может моделироваться уравнениями Колмогорова. При этом заданные начальные состояния данной совокупности будут определяться либо нормативно и планово (детерминированные величины) с учетом специфических параметров данной модели ТХД, либо статистически исходя из климата и топологии открытой площадки НПЗ, а также конкретных условий и ограничений в работе персонала ремонтной бригады. Особенности основного производства, которые могут приводить к появлению агрессивных веществ или каталитических ядов, на данном НПЗ обычно хорошо известны ЛПР. Но регистрируемые им проявления таких событий — величина случайная. Поэтому они могут быть учтены как в статистическом, так и в детерминированном виде.

Если не указывать зависимость вероятностей из формулы (11) от времени, то система дифференциальных уравнений Колмогорова для варианта расположения ВД (шесть ВД для открытой площадки НПЗ длиной менее 30 м) (см. рис. 2 и 3) должна иметь восемь равенств. Но, принимая во внимание, что три кластера состояний совокупности ТХД (с номерами 5, 6, 7) в данной постановке не задействованы, искомые уравнения можно записать таким образом [22]:

$$\begin{cases} dP_1/dt = -P_1 \sum\limits_{i=1}^{6} \varepsilon_i + \sum\limits_{i=1}^{6} P_i \nu_i \\ dP_i/dt = P_1 \varepsilon_i + \sum\limits_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{6} P_{ji} \nu_{i/ij} - P_i \left(\nu_i + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{6} \varepsilon_j \right); \\ dP_{ij}/dt = P_j \varepsilon_i + P_i \varepsilon_j + \sum\limits_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^{6} P_{jik} \nu_{i/ikj} - \\ - P_{ij} \left(\nu_{i/ij} + \nu_{j/ji} + \sum\limits_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^{6} \varepsilon_k \right); \\ dP_{ijk}/dt = P_{ij} \varepsilon_k + P_{ik} \varepsilon_j + P_{jk} \varepsilon_i + \sum\limits_{\substack{l=1 \\ l \neq i,j,k}}^{6} P_{jikl} \nu_{i/ikjl} - \\ - P_{ijk} \left(\nu_{i/ijk} + \nu_{j/jik} + \nu_{k/jik} + \sum\limits_{\substack{l=1 \\ l \neq i,j,k}}^{6} \varepsilon_l \right); \\ P_1 + \sum\limits_{i=1}^{6} P_i + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{6} \sum\limits_{i=1}^{6} P_{ij} + \sum\limits_{\substack{k=1 \\ j \neq k i \neq j,k}}^{6} \sum\limits_{j=1}^{6} \sum\limits_{i=1}^{6} P_{ijk} + \\ + \sum\limits_{\substack{l=1 \\ k \neq l\ j \neq k,l i \neq j,k,l}}^{6} \sum\limits_{k=1}^{6} \sum\limits_{j=1}^{6} \sum\limits_{i=1}^{6} P_{ijkl} + P_{1234} = 1, \end{cases} \quad (14)$$

где P_{1234} — вероятность того, что совокупность ТХД не «выйдет» из первых четырех кластеров своих состояний.

Пятый член системы уравнений показывает, что совокупность ТХД должна находиться в одном из кластеров своих состояний.

Расчет, выполненный на примере шести установленных вдоль открытой площадки ВД, может быть обобщен на любое их количество. В этом случае вместо цифры 6 в суммах будет фигурировать значение $N_{общ}$. Количественные расчеты для данной величины в зависимости от формы открытой площадки будут определены отдельно на конкретном НПЗ.

Число уравнений Колмогорова в системе расчета динамики переходов между состояниями для случая с $N_{общ}$ ВД будет определяться по числу кластеров состояний. Для шести кластеров их восемь. Для $N_{общ}$ их будет: $N_{общ} + 2$.

Заключение

Следует заметить, что представленный выше расчет, выполненный на основе частного примера, может быть обобщен в виде модели оценки готовности ТХД, установленных вокруг открытой установки НПЗ, с учетом проводимых мероприятий калибровки. В этом случае будут откорректированы (рассмотрены в виде функций) v_i, $v_{i/ij}$, $v_{i/ijk}$, $v_{i/ijkl}$. Рассматриваемая модель оценки готовности совокупности ТХД, которая является составной частью подсистемы оповещения о пожаре на НПЗ, может применяться не только для ТХД, но и для других типов датчиков с незначительными изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M.* Accident prevention approach throughout process design life cycle // Process Safety and Environmental Protection. 2014. Vol. 92. No. 5. Pp. 412–422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. *Самарин И.В., Орлов А.И.* Стратегическое планирование на предприятии: основные закономерности среднесрочных бюджетных планов деятельности предприятия // Естественные и технические науки. 2014. № 5. С. 125–133.
3. *Самарин И.В., Фомин А.Н.* Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для анализа системы целевых установок // Инновации и инвестиции. 2014. № 6. С. 132–141.
4. *Топольский Н.Г., Белозеров В.В., Крючков А.В., Мокшанцев А.В., Михайлов К.А.* Автоматизированные системы управления технологическими процессами пожаровзрывоопасных объектов : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 189 с.
5. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 11. С. 15–22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22
6. *Prakash J.* Digital twins define oil & gas 4.0. URL: https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40 (дата обращения: 25.08.2020).
7. *Joly M., Odloak D., Miyake M.Y., Menezes B.C., Kelly J.D.* Refinery production scheduling toward Industry 4.0 // Frontiers of Engineering Management. 2018. Vol. 5. No. 2. Pp. 202–213. DOI: 10.15302/J-FEM-2017024
8. *Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O.* Industry 4.0 — An Introduction in the phenomenon // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No. 25. Pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002
9. *Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В.* Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 239 с.
10. *Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al.* Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research // Faraday Discussions. 2016. Vol. 189. Pp. 85–103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
11. *Szulczyński B., Gębicki J.* Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air // Environments. 2017. Vol. 4. No. 1. P. 21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials: Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional Approaches. New York : Springer, 2013. 442 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
13. *Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F.* Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security // Electrochemical Society Interface. 2010. Vol. 19. No. 4. Pp. 35–40. DOI: 10.1149/2.F04104if
14. *Shrivastava N., Shukla V.* Fire detection & alarm system in oil & gas refinery // International Journal of Scientific Research & Engineering Trends. 2019. Vol. 5. Issue 1. Pp. 26–31. URL: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2019/01/IJSRET_V5_issue1_106.pdf
15. *Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S.* Review — Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors // Journal of The Electrochemical Society. 2020. Vol. 167. No. 3. P. 037552. DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8

16. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М. : Высшая школа, 2006. 575 с.
17. *Прус Ю.В., Крючков А.В., Самарин И.В., Строгонов А.Ю*. Методика прогнозирования готовности единиц противопожарного оборудования АСУТП на предприятиях ТЭК // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 3–2. С. 96–103. URL: http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/%E2%84%9603-2/a0696071-eaa8-44dd-8de1-4b1b00665b25
18. *Сатин А.П., Ле Тхань Бинь, Прус Ю.В*. Прогнозирование готовности пожарной техники на основе марковской модели поломок и восстановления // Технологии техносферной безопасности. 2012. № 5 (45). Ст. 17. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-5/17-05-12.ttb.pdf
19. *Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2018. № 4 (293). С. 143–154. URL: http://article.gubkin.ru/index.php?lang=ru&page=file&id=2089
20. *Прус Ю.В., Колесникова А.Р., Клепко Е.А., Шаповалов В.М.* Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4 (56). С. 16. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/07-04-14.ttb.pdf
21. *Гельфанд И.М.* Лекции по линейной алгебре. М. : Добросвет ; Издательство «КДУ», 2006. 320 с.
22. *Вентцель А.Д*. Курс теории случайных процессов. М. : Наука, 1996. 400 с.

REFERENCES

1. Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M. Accident prevention approach throughout process design life cycle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014; 92(5):412-422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. Samarin I.V., Orlov A.I. Strategic planning at the enterprise: the main patterns of medium-term budget plans of the enterprise. *Natural and technical sciences*. 2014; 5:125-133. (rus).
3. Samarin I.V., Fomin A.N. Strategic planning at the enterprise: application of a method of the analysis of hierarchies to analyze target system installations. *Innovation & Investment*. 2014; 6:132-141. (rus).
4. Topolsky N.G., Belozerov V.V., Kryuchkov A.V., Mokshantsev A.V., Mikhailov K.A. *Automated control systems of technological processes of fire-explosive objects*. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2019; 189. (rus).
5. Topolskiy N.G., Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Model of evaluation of comprehensive safety in the APCS with the use of diagnostic fire detectors for the construction of automated systems of support of management of fire and explosion safety. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):15-22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22 (rus).
6. Prakash J. *Digital twins define oil & gas 4.0*. URL: https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40 (Accessed August 25, 2020).
7. Joly M., Odloak D., Miyake M.Y., Menezes B.C., Kelly J.D. Refinery production scheduling toward Industry 4.0. *Frontiers of Engineering Management*. 2018; 5(2):202-213. DOI: 10.15302/J-FEM-2017024.
8. Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O. Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(25):8-12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002
9. Abrosimov A.A., Topolskiy N.G., Fedorov A.V. *Computer-aided fire and explosion safety systems of petroleum refineries*. Moscow, State Fire Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 1999; 239. (rus).
10. Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday Discussions*. 2016; 189:85-103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
11. Szulczyński B., Gębicki J. Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air. *Environments*. 2017; 4(1):21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials: Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional Approaches*. Springer, New York, 2013; 442. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
13. Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F. Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security. *Electrochemical Society Interface*. 2010; 19(4):35-40. DOI: 10.1149/2.F04104if

14. Shrivastava N., Shukla V. Fire detection & alarm system in oil & gas refinery. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*. 2019; 5(1):26-31. URL: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2019/01/IJSRET_V5_issue1_106.pdf
15. Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S. Review — Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors. *Journal of the Electrochemical Society*. 2020; 167(3):037552. DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8
16. Wentzell A.D. *Probability theory.* Moscow, Higher school Publ., 2006; 575. (rus).
17. Prus Yu.V., Kryuchkov A.V., Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Forecasting technique of readiness of units of fire-fighting equipment of APCS at enterprises of fuel and energy complex using strategic planning. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2019; 3-2:96-103. URL: http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/%E2%84%9603-2/a0696071-eaa8-44dd-8de1-4b1b00665b25 (rus).
18. Satin A.P., Le Thanh Bin, Prus Yu.V. Forecasting of readiness of fire equipment based on the Markov model breakdowns and recovery. *Technology of Technosphere Safety*. 2012; 5(45):17. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-5/17-05-12.ttb.pdf (rus).
19. Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Model of evaluation of fire safety at fuel and energy complex facilities using temporal characteristics from graphs of strategic planning using automated control system. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2018; 4(293):143-154. URL: http://article.gubkin.ru/index.php?lang=ru&page=file&id=2089 (rus).
20. Prus Yu.V., Kolesnikova A.R., Klepko E.A., Shapovalov V.M. Modeling the structure and dynamics of anthropogenic and fire risk in socio-technical systems. *Technology of Technosphere Safety*. 2014; 4(56):16. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/07-04-14.ttb.pdf (rus).
21. Gelfand I.M. *Lectures on linear algebra.* Moscow, Dobrosvet Publ., 2006; 320. (rus).
22. Wentzell A.D. *Course in the theory of stochastic processes.* Moscow, Nauka Publ., 1996; 400. (rus).

Поступила 07.09.2020, после доработки 28.10.2020;
принята к публикации 09.11.2020
Received September 7, 2020; Received in revised form October 28, 2020;
Accepted November 9, 2020

Информация об авторах

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

КРЮЧКОВ Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности критически важных объектов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: kruchkov.a@gubkin.ru

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

Information about the author

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

Alexey V. KRYUCHKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Security of Critical Facilities, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: kruchkov.a@gubkin.ru

Andrey Yu. STROGONOV, Graduate Student of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.75-83
УДК 614.841
ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов

© **В.Н. Филиппов[1], Г.И. Петров[1], Ю.Н. Шебеко[2], С.В. Беспалько[1] ✉, И.К. Сергеев[1]**

1 Российский университет транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В 1970-х годах возникла проблема обеспечения пожаровзрывобезопасности транспортировки сжиженных углеводородных газов (СУГ). Была поставлена задача создать новое поколение цистерн для перевозки СУГ с улучшенными технико-экономическими параметрами и показателями для обеспечения пожаровзрывобезопасности.

В работе проведен анализ нормативной документации по вопросам пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ, который показал отсутствие единой политики в области создания вагонов для опасных грузов. По этой причине появился ряд моделей без устройств пожарной безопасности или с недостаточно эффективными защитными устройствами. Таким образом, в предыдущих исследованиях в области вагоностроения вопросы пожарной и взрывобезопасности были недостаточно изучены, и в целом проблема не была решена.

Основные мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ были приняты Российским университетом транспорта (РУТ (МИИТ)). Собрана статистическая информация о пожароопасных отказах и происшествиях с цистернами эксплуатационного парка с их детальным осмотром. Выявлены наиболее уязвимые места котлов и разработаны методы оценки надежности и долговечности. Определены направления совершенствования конструкции котлов, работающих под давлением.

Были проведены следующие работы:

- проанализированы статистические данные об авариях при перевозке опасных грузов;
- разработаны сценарии развития пожароопасных аварийных ситуаций;
- усовершенствованы нормы расчета и проектирования вагонов;
- разработаны математические модели расчета котла;
- рассчитано нестационарное температурное поле котла в очаге пожара с использованием нелинейных уравнений теплопроводности и метода конечных элементов (МКЭ);
- определено напряженно-деформированное состояние котла при пожаре.

Выводы. В результате проведенных РУТ (МИИТ) работ были созданы цистерны для СУГ с усовершенствованными средствами защиты котлов от аварийных воздействий. Необходима выработка единой политики в области создания вагонов для опасных грузов и согласование требований нормативной документации.

Ключевые слова: сжиженные углеводородные газы; пожарная безопасность; перевозка по железным дорогам; вагоны для опасных грузов; котел цистерны; средства защиты от пожароопасных аварий

Для цитирования: *Филиппов В.Н., Петров Г.И., Шебеко Ю.Н., Беспалько С.В., Сергеев И.К.* Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов (СУГ) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 75–83. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.75-83

✉ *Беспалько Сергей Валерьевич*, e-mail: besp-alco@yandex.ru

Methods of improving the fire and explosion safety of operation of liquefied hydrocarbon gas transportation tanks

© **Victor N. Filippov[1], Gennadiy I. Petrov[1], Yury N. Shebeko[2], Serge V. Bespalco[1] ✉, Ivan K. Sergeev[1]**

1 Russian University of Transport (Obraztsova St., 9, Bldg. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of fire and explosion safety of liquefied hydrocarbon gas transportation arose in the 1970s. The task was set to design new generation tanks having improved technical and economic parameters and indicators to ensure fire and explosion safety.

The co-authors have conducted the analysis of regulatory documentation covering the fire and explosion safety of hydrocarbon gas transportation tanks, which shows the absence of any unified policy in the design of cars designated for hazardous cargoes. Hence, a number of models, having no or insufficiently effective protective devices, are produced. Therefore, the issues of fire and explosion safety were understudied in the earlier research works on design of railroad cars, and the problem has not been resolved.
Principal actions aimed at the fire and explosion safety of hydrocarbon gas transportation tanks were implemented by the Russian University of Transport (MIIT). Statistical information on fire hazardous failures and fleet tank accidents, as well as their detailed investigation has been collected. Tank barrel vulnerabilities have been identified; reliability and durability assessment methods have been developed.
Priorities for improving the pressurized tank design are outlined.
The following items of work have been performed:

- analysis of statistical data on hazardous cargo transportation accidents,
- development of fire hazard emergency scenarios;
- improvement of "Railroad car analysis and design regulations",
- development of mathematical models designated for the analysis of tanks,
- identification of an unstable temperature field inside a tank barrel, if in the seat of fire, using non-linear heat conduction equations and the finite element method (FEM),
- identification of the stress-strain state of a tank barrel during a fire.

Conclusions. Following the completion of the work performed by the Russian University of Transport (MIIT), hydrocarbon gas tanks have obtained a better barrel emergency impact protection. A unified policy in the design of cars for hazardous cargoes is needed and regulatory documentation requirements must be harmonized.

Keywords: liquified petroleum gases; fire safety; railway transportation; hazardous cargo cars; tank barrel; safety equipment preventing fire hazards arising as a result of accidents.

For citation: Filippov V.N., Petrov G.I., Shebeko Yu.N., S.V. Bespalco, Sergeev I.K. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety.* 2020; 29(6):75-83. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.75-83 (rus).

✉ *Sergey Valeryevich Bespalco*, e-mail: besp-alco@yandex.ru

Введение

В середине 1970-х годов возникла задача обеспечения безопасности перевозок опасных грузов и в первую очередь — сжиженных углеводородных газов (СУГ). При этом следует отметить, что на железнодорожном транспорте в тот период наблюдались инциденты, связанные с герметичностью сосудов, работающих под давлением, с дальнейшим возникновением пожара и взрыва.

Цель настоящей работы состоит в представлении результатов многолетних исследований, проводившихся в Российском университете транспорта (МИИТ), с целью обеспечения пожаровзрывобезопасности цистерн при перевозке сжиженных углеводородных газов по железным дорогам.

Анализ нормативной документации по вопросам пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ

При перевозке по железным дорогам России сжиженных углеводородных газов внимание вопросам безопасности стало уделяться в последние годы XX в., когда происходила массовая перевозка грузов 2 и 3-го классов опасности по железным дорогам.

В 1992 г. были приняты Правила пожарной безопасности на железнодорожном транспорте[1], регламентирующие общие вопросы пожарной безопасности. В 1996 г. утверждены нормативные документы, относящиеся непосредственно к вопросам перевозки опасных грузов, а именно: Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам[2] и Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам[3].

Одновременно с этим возникла проблема более глубокой проработки мероприятий, связанных с аварийными ситуациями, включая вопросы пожарной безопасности, экологической безопасности, сохранения жизни и здоровья людей. Была поставлена задача создания соответствующих нормативных документов.

В результате был разработан и принят Федеральный закон «О техническом регулировании»[4] (2002 г.), в соответствии с которым при перевозке по железным дорогам опасных грузов необходимо обеспечение безопасности в следующих сферах: безопасность технических устройств, безопасность на опасном объекте; взрывобезопасность; пожар-

[1] Правила пожарной безопасности на железнодорожном транспорте (ППБО-109-92) (с изменениями и дополнениями) : утверждены Министерством путей сообщения Российской Федерации 11 ноября 1992 г. № ЦУО-112).

[2] Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам (с изменениями от 16 октября 2019 г.) : введены в действие на 15 заседании СЖТ СНГ, протокол от 5 апреля 1996 г. № 15.

[3] Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам : утверждены Министерством по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации и Министерством путей сообщения Российской Федерации 31 октября, 25 ноября 1996 г. № 9-733/3-2, ЦМ-407.

[4] О техническом регулировании : Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ.

ная, механическая, термическая, электрическая, химическая, биологическая, радиационная безопасность и безопасность излучений.

Кроме того, был принят Федеральный закон «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации»[5], который также детализирует требования безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте.

В настоящее время весь создаваемый подвижной состав железных дорог должен удовлетворять требованиям этих нормативных документов, в том числе с точки зрения обеспечения пожаровзрывобезопасности. В наибольшей степени это касается специализированных вагонов, предназначенных для перевозки грузов 2 и 3-го классов опасности.

Помимо названных, были введены нормативные документы, играющие отрицательную роль в обеспечении пожарной безопасности процесса перевозки опасных грузов. В 2012 г. ОАО «ВНИИЖТ» был разработан проект межгосударственного стандарта «Вагоны грузовые…»[6], в котором при проектировании вагонов для опасных грузов не уделено внимания аварийным расчетным режимам. Кроме того, в 2004 г. из новой редакции Правил[7] были исключены сценарии пожароопасных аварийных ситуаций.

В результате отсутствия единой политики в области создания вагонов для опасных грузов появился ряд новых моделей вагонов без устройств обеспечения пожаровзрывобезопасности или с недостаточно эффективными защитными устройствами.

Таким образом, в ранее выполнявшихся исследованиях в области вагоностроения вопросы пожаровзрывобезопасности не были достаточно изучены, и в целом проблема не была решена.

Основные мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ

В этой связи Министерство путей сообщения (МПС) и основной владелец цистерн Акционерное общество «СГ-Транс» поставили перед МИИТ задачи создания нового поколения цистерн для СУГ с улучшенными технико-экономическими параметрами и показателями по обеспечению пожарной безопасности перевозок. Основным парком цистерн в этот период являлись цистерны с объемом котла 51…54 м^3, производящиеся фабрикой вагонов в г. Свидница (Польша) и Ждановским заводом тяжелого машиностроения (ЖЗТМ, г. Жданов, ныне г. Мариуполь).

Для решения поставленной задачи МИИТ провел сбор статистической информации о пожароопасных отказах и инцидентах цистерн эксплуатационного парка с детальным осмотром цистерн предприятия «СГ-Транс» на ремонтно-испытательных пунктах в городах Кириши, Кстово, Новокуйбышевске, Долине, Тенгизе, Оренбурге и Тобольске. Цистерны, приписанные к соответствующим ремонтно-испытательным пунктам, работали по всей стране в общесетевых условиях с выходом отдельных вагонов на железные дороги колеи 1435 мм. На основании результатов осмотра и анализа статистических данных о пожароопасных отказах по данным соответствующих предприятий были определены наиболее уязвимые места цистерн и разработаны методики оценки надежности и долговечности с последующим определением потребности в запасных частях [1, 2].

Наряду с осмотрами производилось освидетельствование цистерн с измерением толщины оболочки, анализом качества сварных швов и соответствия основных параметров современным требованиям по обеспечению безопасности.

Были определены следующие направления совершенствования конструкции:

1) выбор оптимальных технико-экономических параметров цистерн объемом от 70 до 100 м^3;
2) совершенствование сливо-наливной арматуры, поскольку было установлено, что конструкция сливо-наливной арматуры, находящейся на цистернах, не учитывала уровень динамических воздействий, возникающих при маневрах и других эксплуатационных режимах;
3) улучшение технологии изготовления основного элемента цистерны — котла, работающего под давлением в 2,0 МПа, поскольку было установлено, что, хотя у цистерн для СУГ отсутствует коррозионное воздействие на оболочку, однако котел имеет недостаточное качество сварных швов;
4) снижение динамических нагрузок на цистерны и совершенствование их конструкции, поскольку при анализе повреждений цистерн было определено, что они подвергались чрезмерным динамическим нагрузкам, что вызывало повреждения ударной розетки, рамы вагона и возникновение аварийных режимов, связанных с пробоем при маневровых соударениях и вызывающих пожар или взрыв.

Для решения задач, перечисленных выше, было определено, что необходимо изменять технологию

[5] О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

[6] Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Проект межгосударственного стандарта. М. : ВНИИЖТ, 2012.

[7] Правила технической эксплуатации железных дорог : утверждены Приказом Министерства транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286. Последняя редакция действует с 1 июля 2017 г.

изготовления, введя стопроцентный контроль качества сварных швов и стопроцентный контроль герметичности основных листов. Эти предложения потребовали внесения изменений в технологию изготовления котлов на заводах Польши, Украины, а также цистерн для СУГ, изготавливающихся фирмами Hitachi и Kawasaki (Япония). Для повышения надежности и долговечности сливо-наливной арматуры потребовалось привлечение высококвалифицированных подразделений специального машиностроения, к числу которых относится Атомармпроект, входящий в состав компании «Сплав» в Великом Новгороде, который разработал, изготовил, испытал и довел до серийного производства комплекс арматуры на основе шаровых кранов, контрольных кислородных вентилей с сильфонным уплотнением. При этом показатели коррозионной стойкости повысились как для корпусов, так и для клапанов с пружинами, что повысило надежность работы упругих элементов и увеличило их срок эксплуатации до двух лет.

Для снижения динамических нагрузок, воздействующих на цистерну, были проведены работы по созданию эластомерных поглощающих аппаратов при участии МИИТ и фирмы Kamax, и последующее серийное производство таких аппаратов было налажено на совместном предприятии ЛЛМЗ Kamax в России [3]. Параллельно были разработаны и реализованы мероприятия по изменению конструкции рамы цистерны в части усиления зоны установки поглощающего аппарата и изменению конструкции лап, соединяющих котел с рамой.

При оценке прочностных свойств цистерны для СУГ было выявлено, что наиболее нагруженной зоной котла является выштамповка центральной части котла, через которую должен был осуществляться полный слив продукта. Это было подтверждено результатами прочностных испытаний, и был предложен вариант котла без выштамповки (поддона), а сам котел был спроектирован с листами различной толщины, что позволило, по существу, перейти на новое поколение цистерн с объемом котла от 73 до 75 м^3. Изготовление таких котлов осуществлялось на заводах предприятия «Уралвагонзавод» (УВЗ, г. Нижний Тагил), «Атоммаш» (г. Волгодонск), Ждановский завод тяжелого машиностроения (ЖЗТМ, г. Жданов), ООО «Завод “Буммаш”» (г. Петрозаводск). Переход на цистерны с увеличенным диаметром котла позволил повысить их эффективность и снизить число цистерн эксплуатационного парка, требуемых для осуществления необходимого грузооборота.

Для решения задач, связанных с повышением пожаровзрывобезопасности эксплуатации, были проведены следующие работы. Выполнен анализ статистических данных о пожароопасных авариях и инцидентах при перевозке опасных грузов (сжиженных газов, нефтепродуктов) в вагонах-цистернах и вагонах специального назначения:

а) по месту инцидента (станция, перегон, погрузка-разгрузка);
б) скоростям движения, скоростям соударения;
в) характеристикам участка пути (прямой, кривой).

Выявлены причины возникновения аварий при инцидентах.

Разработаны сценарии развития аварийной ситуации при механическом или тепловом воздействии [4–7]. Определены основные параметры аварийного воздействия на кузов вагона. Произведен выбор расчетных аварийных режимов по критерию возможного сохранения герметичности кузова.

Выполнена оценка живучести кузовов (котлов) цистерн существующего парка при предельно допускаемых сроках службы (требуемая толщина оболочек с учетом коррозии, возможные зоны повреждения, трещины котлов в опорных зонах и узлах их крепления с рамой).

Разработаны предложения по технологии изготовления и контроля качества сварных швов.

Произведен анализ возможных схем установки элементов защиты котла при аварийном воздействии.

Проанализированы существующие методы расчета и испытания вагонов с учетом аварийных воздействий, в том числе воздействий от очага пожара. Осуществлен выбор основных принципов обеспечения защиты котлов цистерн от этих воздействий.

Сформулированы предложения по корректировке Норм расчета и проектирования вагонов[8] — изменения и дополнения[9].

Разработаны варианты котлов цистерн с дифференцированной толщиной котла, системой подкрепляющих элементов и узлов соединения котлов с рамой, а также котлов цистерн из коррозионностойких материалов (композитов).

Созданы математические модели для расчета элементов котлов с учетом воздействия расчетных аварийных режимов, включая механические и тепловые воздействия от очага пожара [8–12]. Методики основаны на применении следующих методов: принципа Лагранжа; метода конечных элементов (МКЭ); уравнения Лагранжа второго рода. Выполнена верификация новых методик расчета путем

[8] Нормы расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации. М. : ФГУП ВНИИЖТ – ФГУП ГосНИИВ, 2004.

[9] Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996.

проведения натурных испытаний при столкновении с аварийными скоростями (V = 55 км/ч) и сходом с рельсов и падением с высокой насыпи.

Произведены расчеты статической и динамической нагруженности котлов цистерн для опасных грузов [13, 14]:

а) осесимметричных нагрузок (внутреннего давления);

б) локальных (опорных) нагрузок;

в) устойчивости котла от вакуума.

Определение нестационарного температурного поля котла цистерны в очаге пламени производилось с применением нелинейных уравнений теплопроводности, учетом зависимости теплофизических параметров от температуры; МКЭ; метода Адамса при интегрировании по времени [14, 15].

Разработанная методика определения напряженно-деформированного состояния (НДС) котла цистерн в очаге пламени [14] основана на применении принципа Лагранжа и МКЭ и учитывает следующие особенности конструкции:

а) зависимость НДС котла от неравномерного температурного поля;

б) зависимость механических характеристик материала котла от температуры;

в) влияние огнезащитного покрытия.

Методика определения динамической нагруженности элементов вагона при маневровых соударениях основана на применении принципа Даламбера, методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, уравнений гидродинамики в форме теории мелкой воды, метода характеристик. Методика позволяет учитывать:

а) разные схемы соударения;

б) разные типы поглощающих аппаратов;

в) разные комбинации поглощающих аппаратов;

г) колебания жидкости в котле цистерны на основе уравнений гидродинамики;

д) возможность гидроудара.

Разработаны теоретические методы определения динамических качеств грузовых вагонов при движении их по реальным участкам магистральных путей железных дорог и определения неблагоприятных сочетаний параметров ходовых частей вагона и возможных путей схода вагонов с рельсов. Разработаны и реализованы предложения по корректировке параметров пути и ходовых частей грузовых вагонов, обеспечивающие снижение вероятности схода вагонов с рельсов.

Проведены испытания вагонов при соударениях со скоростями 20…25 км/ч и предложены варианты технических средств защиты котлов цистерн для перевозки опасных грузов от пробоя при аварийных соударениях. Разработанные технические средства защиты котлов включают в себя: поглощающие аппараты высокой энергоемкости, предохранители от саморасцепа автосцепок при авариях, торцевые защитные экраны. Все эти технические средства испытаны при расчетных аварийных режимах, приняты к серийному производству и устанавливаются на цистерны для перевозки грузов 2 и 3-го классов опасности. Технические решения защищены патентами.

На основе термодинамических моделей в ходе оценки живучести цистерн при аварийном тепловом воздействии (например, в очаге пожара) разработаны параметры, сконструированы, испытаны и приняты к серийному производству сливо-наливная арматура, предохранительные клапаны и система защитных дуг безопасности для цистерн, перевозящих грузы 2-го класса опасности [16–23]. Комплекс приборов прошел испытания на стендах, на моделях в очаге пожара, на натурных цистернах при сходе с рельсов и опрокидывании с высокой насыпи высотой до 15 м. Конструкции приборов защиты приняты к серийному производству и устанавливаются на вагоны для перевозки опасных грузов.

На основе использования термодинамических моделей развития аварийных ситуаций с котлами цистерн в очаге пожара выбраны и испытаны варианты термозащиты с использованием огнезащитных покрытий типа СГК-1 и СГК-2, обеспечивающие трехкратное повышение времени пребывания цистерн в очаге пожара до начала разрушения котла по сравнению с котлами без покрытия. В сочетании с применением предохранительных клапанов с увеличенным проходным сечением этим существенно снижается вероятность взрыва цистерн при производстве аварийно-восстановительных работ на железных дорогах. Цистерны для СУГ (2-го класса опасности) приняты к серийному производству.

Разработана методика определения условий пробоя котла цистерны чужеродным телом, основанная на применении следующих подходов: определение энергии образования вмятины в условиях текучести материала, оценка прочности по величине предельной контактной силы, аппроксимация вмятины пирамидой или конусом. Методика учитывает случаи:

а) плоской и выпуклой оболочек;

б) различной формы внедряемого тела.

Указанные исследования включали в себя конструкторские работы по изготовлению опытных образцов, разработку эксплуатационной документации и технологии серийного производства. Испытания проводились на ремонтно-испытательных пунктах Кириши, Долина, Тенгиз, на стендах фабрики вагонов в Свиднице, Атомармпроекте, на полигонах железнодорожных войск. В испытании участвовали как представители заводов-изготовителей, так и Московский институт теплотехники (МИТ),

Цистерна модели 15-9503 АВП, оснащенная всеми разработанными средствами противопожарной защиты
15-9503 AVP tank model equipped with all recently developed fire protection means

НПО машиностроения (г. Реутов) ВНИИПО, НИИ испытаний ракетных двигателей, некоторые образцы котлов цистерн, изготавливавшихся в Польше и Японии, испытывались в испытательных центрах этих предприятий по единой программе и методике, разработанной МИИТ.

Выводы

В результате проведенных работ удалось создать цистерны с усовершенствованными котлами, новой арматурой и различными техническими средствами защиты котлов от разгерметизации при динамическом и тепловом воздействии. На основании комплекса проведенных работ была создана цистерна модели 15-9503 АВП (рис.) с объемом котла 95 м^3 с усовершенствованной сливо-наливной арматурой, в состав которой входит предохранительный клапан увеличенного сечения, что исключает взрывы цистерн при попадании их в очаг пожара, с огнезащитным покрытием типа СГК-1 (СГК-2), увеличивающим огнестойкость в три раза по сравнению с обычной цистерной.

Однако наряду с работами, проводившимися МИИТ, отдельные заводы проводили собственные конструкторские разработки, которые без должных обоснований зачастую принимались к серийному производству. В некоторых случаях при разработке несущих элементов были нарушены правила конструкторских решений, использовавшихся в течение более ста лет при изготовлении сосудов, находящихся под контролем Ростехнадзора. Некоторые производители без должного обоснования исключили важнейший технологический процесс — термообработку котла после сварки, что может сказаться на долговечности таких цистерн, срок службы которых ранее был установлен равным 30 годам. Для решения вопроса о безопасности эксплуатации цистерны для СУГ в изменившихся условиях необходимо учитывать все конструкторские решения, применяемые на цистернах заводов-изготовителей.

Для принятия кардинальных решений об изменении режимов эксплуатации цистерн для СУГ необходимо иметь достаточный объем статистической информации о состоянии вагонов в количестве не менее 10 % от общего парка цистерн.

Необходима выработка единой политики в области создания вагонов для опасных грузов и согласование требований нормативной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смольянинов А.В., Филиппов В.Н.* Транспортировка опасных грузов // Железнодорожный транспорт. 1990. № 7. С. 31–33.
2. *Дмитриев В.В., Филиппов В.Н., Канивец Р.Ф., Смольянинов А.В.* Совершенствование цистерн для сжиженного газа // Железнодорожный транспорт. 1991. № 8. С. 46–48.
3. *Filippow W.N., Stanislaw K.* Badania prototypovychurzadzen, ochraniajacych armature idennice-wagonow-cystern w awaryjnych sytuacjach // Przegląd Kolesowy. 1993. No. 8. Pp. 31–33
4. *Шебеко Ю.Н., Шевчук А.П., Смолин И.М., Филиппов В.Н., Черноплеков А.Н., Бородкин А.Н. и др.* Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железно-

дорожным транспортом. 1. Постановка задачи и рассмотрение типовых сценариев аварии // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 4. С. 46–51.
5. *Шевчук А.П., Присадков В.И., Косачев А.А., Филиппов В.Н., Иванов В.А.* Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 3. Снижение пожаровзрывоопасности железнодорожных цистерн со сжиженным углеводородным газом // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1993. Т. 2. № 3. С. 35–38.
6. *Корольченко А.Я., Горшков В.И., Земский Г.Т., Филиппов В.Н., Шебеко Ю.Н.* Правила пожарной безопасности при перевозке в железнодорожных цистернах сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1993. Т. 2. № 3. С. 39–42.
7. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справоч. пособие / под ред. В.Н. Котуранова, В.Н. Филиппова. М. : Изд-во стандартов, 1993. 214 с.
8. *Смольянинов А.В., Филиппов В.Н.* Методика расчета и проектирования дуг безопасности котлов цистерн // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : тр. II Междунар. науч.-техн. конф. Т. I. М. : МИИТ, 1996. С. 86.
9. *Корольченко А.Я., Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н.* О влиянии огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожарная безопасность. История, состояние, перспективы : мат. XIV Всеросс. науч.-практ. конф. Ч. 2. М. : ВНИИПО МВД РФ, 1997. С. 271–273.
10. *Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Горшков В.И.* Исследование влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 1. С. 24–32.
11. *Шебеко Ю.Н., Назаренко В.А., Филиппов В.Н., Навценя В.Ю., Костюхин А.К., Замышевский Э.Д. и др.* Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. 2004. № 2. С. 73–71.
12. *Навценя В.Ю.* Развитие научных основ и совершенствование методов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями : дис. … д-ра техн. наук. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 574 с.
13. *Филиппов В.Н., Радзиховский Е.А*. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1994. № 3. С. 9–12.
14. *Беспалько С.В.* Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов : дис. … д-ра техн. наук. М. : МИИТ, 2000. 424 с.
15. *Шебеко Ю.Н., Назаренко В.А., Филиппов В.Н., Навценя В.Ю., Костюхин А.К., Замышевский Э.Д. и др.* Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. 2004. № 2. С. 73–71.
16. *Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Болодьян И.А.* Исследование различных способов противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков : мат. XV науч.-практ. конф. М., 1999. С. 132–133.
17. *ShebekoYu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al.* Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves // 5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Shanghai, October 24–29, 1999. International Academic Publishers, 1999. Pp. 215–226.
18. *Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Токарев П.М.* Исследование способов защиты железнодорожных цистерн для перевозки СУГ от воздействия тепловых нагрузок в условиях пожара // Безопасность движения поездов : сб. тр. М. : МПС МИИТ, 1999. С. IV-17–IV-18.
19. *ShebekoYu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al.* An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels // Conference Proceedings of Interflame'99, 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, UK, 29 June – 1 July, 1999. London : Interscience Communications Ltd., 1999. Pp. 1141–1146.
20. *Филиппов В.Н., Недорчук Б.Л., Козлова Д.И., Скуратов А.Е.* Повышение экологической безопасности перевозок жидких опасных грузов в железнодорожных цистернах за счет предотвращения утечек // Безопасность движения поездов : сб. тр. М. : МПС МИИТ, 2000. Книга II. С. V–19.

21. *Nedorchuk B.L., Filippow V.N., Shebeko Yu.N.* General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials // Pojazdy szynowe na przelomie wikow. Krakow : Arlamow, 2000. Vol. 1. Pp. 197–203.
22. *Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N.* Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases // Pojazdy szynowe na przelomie wikow. Krakow : Arlamow, 2000. Vol. 3. Pp. 109–118.
23. *Страхов В.П., Крутов В.М., Шебеко Ю.Н.* О возможности использования конструктивной огнезащиты для перевозки грузов в железнодорожных цистернах // Безопасность движения поездов : сб. тр. М. : МИИТ, 2005. VII-24–VII-25.

REFERENCES

1. Smolyaninov A.V., Filippov V.N. Transport of dangerous goods. *Railway transport*. 1990; 7:31-33. (rus).
2. Dmitriev V.V., Filippov V.N., Kanivets R.F., Smolyaninov A.V. Improvement of tanks for liquefied gas. *Railway transport*. 1991; 8:46-48. (rus).
3. Filippow W.N., Stanislaw K. Badaniaprototypovychurzadzen, ochraniajacych armature idennicewagonow-cystern w awaryjnychsytuacjach. *PrzeglądKolesowy*. 1993; 8:31-33. (pol).
4. Shebeko Yu. N., Shevchuk A.P., Smolin I.M., Filippov V.N., Chernoplekov A.N., Borodkin A.N., et al. Fire and explosion safety of transportations of liquefied hydrocarbon gases by rail. 1. Statement of the problem and consideration of typical scenarios of accident. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(4):46-51. (rus).
5. Shevchuk A.P., Prisadkov V.I., Kosachev A.A., Filippov V.N., Ivanov V.A. Pozharovzryvobezopasnost transportations of liquefied petroleum gases by rail. 3. Reduction of fire and explosion hazard of railway tanks with liquefied petroleum gas. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 2(3):35-38. (rus).
6. Korolchenko A.Ya., Gorshkov V.I., Zemsky G.T., Filippov V.N., Shebeko Yu.N. Fire safety Rules for transportation of liquefied petroleum gases in railway tanks. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 2(3):39-42. (rus).
7. *Specialized tanks for the transport of dangerous goods : reference. manual* / V.N. Koturanova, V.N. Filippov (ed.). Moscow, Publishing house of standards, 1993; 214. (rus).
8. Smolyaninov A.V., Filippov V.N. A method for calculation and design of safety arcs for railway tanks. Actual problems of railway transport. *Actual problems of railway transport : Proceedings of 2nd International Scientific and Technical Conference. Vol. 1*. Moscow, MIIT Publ., 1996; 86. (rus).
9. Korolochenko A.Ya., Shebeko Yu.N., Filippov V.N. An influence of a fire retardant coating on a behavior of LPG vessel in a fire. *Fire Safety. History, state of art, perspectives. Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow, VNIIPO Publ., 1997; 271-273. (rus).
10. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Gorshkov V.I. An investigation of an influence of a fire retardant coating on a behavior of a LPG vessel in a fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(1):24-32. (rus).
11. Shebeko Yu.N., Nazarenko V.A., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Zamyshevsky E.D. et al. Experimental research of thin-walled envelope behavior in test flame. *Pozharnaya bezopasnost/ Fire Safety*. 2004; 2:73-71. (rus).
12. Navzenya V.Yu. *Development of scientific bases and improvement of methods of ensuring fire and explosion safety of technological equipment with combustible gases and liquids : thesis for the degree of doctor of technical Sciences*. Moscow, FGU VNIIPO EMERCOM of Russia, 2003; 574. (rus).
13. Filippov V.N., Radzikhovsky E.A. Investigation of the behavior of cars in an emergency collision. *VNIIZHT Scientific Journal*. 1994; 3:9-12. (rus).
14. Bespalko S.V. *Development and analysis of models of damaging effects on boilers of tanks for transportation of cryogenic products : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, MIIT, 2000; 424. (rus).
15. Shebeko Yu.N., Nazarenko V.A., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Zamyshevsky E.D. et al. Experimental study of the behavior of a thin-walled shell in a flame hearth. *Fire safety*. 2004; 2:73-71. (rus).
16. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Bolodyan I.A. An investigation of methods of a fire protection of LPG vessels. Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov. *Combustion Problems and a Fire Extinguishing on a boundary of Century : Proceedings of the 15th scientific conference*. Moscow, VNIIPO Publ., 1999; 132-133. (rus).

17. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves. *5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Shanghai, October 24-29, 1999*. International Academic Publishers, 1999; 215-226. (rus).
18. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Tokarev P.M. An investigation of methods for a protection of LPG railway tanks at a thermal load from a fire. *Safety of Railways : Proceedings.* Moscow, Moscow State Railway University Publ., 1999; 4/17-4/18. (rus).
19. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. *Conference Proceedings of Interflame'99, 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, UK, 29 June - 1 July, 1999*. London, Interscience Communications Ltd., 1999; 1141-1146.
20. Filippov V.N., Nedorchuck B.L., Kozlova D.I., Scuratov A.E. An elevation of an ecological safety of liquid hazardous goods transportation in raiway tanks. *Safety of Railways : Proceedings*. Book 2. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2000; 5/19. (rus).
21. Nedorchuk B.L., Filippow V.N., Shebeko Yu.N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials. *Pojazdy szynowe na przelomie wikow*. Krakow, Arlamow, 2000; 1:197-203. (pol).
22. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N. Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pojazdy szynowe na przelomie wikow*. Krakow, Arlamow, 2000; 3:109-118. (pol).
23. Strakhov V.P., Krutov V.M., Shebeko Yu.N. A possibility of an application of a constructive fire protection for railway tanks. *Safety of Railways : Proceedings*. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2005; 7/24-7/25. (rus).

Поступила 04.09.2020, после доработки 19.10.2020; принята к публикации 20.11.2020
Received September 4, 2020; Received in revised form October 19, 2020; Accepted November 20, 2020

Информация об авторах

ФИЛИППОВ Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 546422; Scopus Author ID: 57205076108; e-mail: filipovvn@gmail.com

ПЕТРОВ Геннадий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 703184; Scopus Author ID: 57206464834; e-mailpetrovgi@gmail.com

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

БЕСПАЛЬКО Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Балашиха, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57215138824; РИНЦ ID: 274453; ORCID: 0000-0002-6027-6039; e-mail: besp-alco@yandex.ru

СЕРГЕЕВ Иван Константинович, ассистент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1048369; ORCID: 0000-0001-8910-7573; e-mail: vana1997@yandex.ru

Information about the authors

Victor N. FILIPPOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 546422; Scopus Author ID: 57205076108; e-mail: filipovvn@gmail.com

Gennadiy I. PETROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 703184; Scopus Author ID: 57206464834; e-mail petrovgi@gmail.com

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

Serge V. BESPALCO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 274453; Scopus Author ID: 57215138824; ORCID: 0000-0002-6027-6039; e-mail: besp-alco@yandex.ru

Ivan K. SERGEEV, Assistant of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1048369; ORCID: 0000-0001-8910-7573; e-mail: vana1997@yandex.ru

https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.84-90
УДК 614.844.5
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Тушение возгораний кабелей комплектных трансформаторных подстанций

© **Е.А. Овсянников[1, 2], Д.А. Корольченко[2] ✉, В.Л. Семиков[3]**

1 ООО «Пиротек» (Россия, 129226, г. Москва, ул. Докукина, 6, оф. 1)
2 Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
3 Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно статистическим данным, на пожары, связанные с электротехническим хозяйством, приходится большая доля всех случаев. В связи с этим актуальным является повышение уровня противопожарной защиты объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В статье рассмотрен способ тушения электроустановок с применением пены высокой кратности. В качестве обоснования данных решений разработана методика расчета времени тушения пожаров высокократной пеной. Целью данной работы является определение расчетным путем зависимости времени тушения и удельного расхода пены, подаваемой для тушения пожара. Поставлены задачи исследования: 1) определить основные расчетные величины и перечень исходных данных; 2) рассчитать зависимость времени тушения и удельного расхода на примере комплектной трансформаторной подстанции 2БКТП-1000кВА.
Методика расчета. Строится на уравнении материального баланса пены, поданной для тушения, и пены, разрушенной при контакте с нагретой поверхностью кабельно-проводниковой продукции, составляющей основную пожарную нагрузку в электроустановках.
Результаты исследования. Произведен расчет времени тушения пожара на примере комплектной трансформаторной подстанции 2БКТП-1000кВА. По результатам расчета определены зависимости времени тушения от удельного расхода и интенсивности подачи пены.
Выводы. Определены основные расчетные величины, необходимые для построения модели тушения. Показан оптимальный удельный расход и интенсивность подачи пены. Дана авторская оценка возможности применения высокократной пены для тушения пожаров на электроустановках.

Ключевые слова: генераторы пены высокой кратности; время тушения; удельный расход пены; уравнение материального баланса; электроустановки

Для цитирования: *Овсянников Е.А., Корольченко Д.А., Семиков В.Л.* Тушение возгораний кабелей комплектных трансформаторных подстанций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 84–90. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.84-90

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

Extinguishment of cable fires at packaged transformer substations

© **Evgeniy A. Ovsyannikov[1, 2], Dmitriy A. Korolchenko[2] ✉, Vladimir L. Semikov[3]**

1 PIROTEK Ltd (Dokukina St., 6, office 1, Moscow, 129226, Russian Federation)
2 National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
3 State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. According to the statistical data, electrical fires account for the majority of all fire accidents. Hence, better fireproofing of fuel and energy facilities is a relevant issue. The article addresses electrical fire extinguishment using high-expansion foam. An extinguishment time analysis methodology, applicable to fire extinguishment using high-expansion foam, has been developed to validate these solutions. The purpose of this article is to calculate the dependence between the fire extinguishment time and the foam consumption rate. The research objectives are to 1) identify the principal values to be used in the calculations and the list of input data; 2) to identify the dependence between the extinguishment time and the foam consumption rate using packaged transformer substation 2BKTP (1,000 kVA) as an example.
Calculation methodology. The calculation methodology is based on the material balance equation between the amount of foam, applied for firefighting purposes, and the amount of foam, destroyed as a result of its contact with the heated wire surface, which is the main fire load inside burning electrical facilities.

Research results. The co-authors have calculated the fire suppression time using packaged transformer substation 2BKTP (1,000 kVA) as an example. Dependencies between fire extinguishment time, specific foam consumption rate, and foam application rate are identified.
Conclusions. The co-authors have identified the main values, needed to simulate a fire extinguishing model. They have also shown optimal foam consumption and application rates and offered their assessment of the applicability of high-expansion foam to electrical fires.

Keywords: high-expansion foam generators; extinguishment time; specific foam consumption rate; material balance equation; electrical facilities

For citation: Ovsyannikov E.A., Korolchenko D.A., Semikov V.L. Extinguishment of cable fires at packaged transformer substations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):84-90. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.84-90 (rus).

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

Введение

Комплектные трансформаторные подстанции представляют собой сложный технологический объект. Причинами возгораний трансформаторных подстанций могут служить: ошибки при эксплуатации объекта техническим персоналом, некачественный электромонтаж или ремонт оборудования, кроме того, возможны перенапряжения электросетей, которые также способны привести к возникновению пожара [1, 2].

Из многочисленных статистических данных следует, что причинами пожаров на электроустановках являются: короткие замыкания — 43,3 %, перегрев горючих материалов и предметов, находящихся вблизи от посторонних источников тепла — 33,5 %, перегрузка проводов, кабелей — 12 %, искрение и возникновение электрической дуги — 3,5 %, нагрев строительных конструкций при выносе (переходе) из них электрических кабелей — 3 % [3, 4].

Ярким примером негативных последствий на объектах энергетики может служить авария 2005 г. на подстанции № 510 «Чагино», расположенной на юго-востоке Москвы. По оценке специалистов, причинами аварии послужили: старое электрооборудование подстанции; жаркая погода (авария произошла летом — в этот период нагрузки на электросеть возрастают по причине активного использования различной климатической техники со стороны потребителей); низкая квалификация персонала. От энергоснабжения были отключены 15 питающих центров и 5 городских ТЭЦ. В результате без электричества остались несколько районов Москвы, Подмосковья и соседних областей. По уточненным данным правительства Москвы, ущерб от аварии только в столице составил 1,7 млрд руб. [5, 6].

С точки зрения тушения загораний, у объектов электроэнергетики существует ряд особенностей. Сложность ликвидации пожаров на подобных объектах заключается в наличии большой пожарной нагрузки в виде изоляции кабельной продукции, наличия трансформаторных масел [7–9]. Также стоит отметить, что тушение электроустановок осуществляется после снятия напряжения с электрооборудования, что, в свою очередь, препятствует своевременному тушению загораний [10–12].

Цель работы: разработать методику расчета времени тушения пожаров высокократной пеной на объектах электроэнергетики, в которых пожарную нагрузку преимущественно составляет изоляция кабельной продукции. Определить расчетным путем зависимость времени и удельного расхода при тушении пожара.

Задачи исследования:

- определить основные расчетные величины и перечень исходных данных;
- рассчитать зависимость времени тушения и удельного расхода на примере комплектной трансформаторной подстанции 2БКТП-1000кВА (рис. 1).

Методика расчета

В данной статье рассмотрен способ тушения высокократной полидисперсной пеной на примере комплектной трансформаторной подстанции 2БКТП-1000кВА (см. рис. 1).

Блок комплектной трансформаторной подстанции 2БКТП-1000кВА представляет собой функционально полноценную трансформаторную подстанцию и разделен металлической перегородкой на два отсека: отсек РУ-10/0,4кВ и отсек силового трансформатора [13, 14].

В качестве примера моделируется пожар в отсеке распределительных устройств. Пожарная нагрузка представляет собой изолированный электрический кабель. Связки кабеля расположены на высоте 2 м, длина пучка кабеля равна 9,1 м, в связке проложено 20 образцов радиусом 0,05 м.

Известно, что на распространение огня влияет не только объем проложенных кабелей, но и их взаимное размещение в пространстве [15]. Так, к примеру, кабели общепромышленного исполнения типов ВВГ и НРГ в количестве 5 шт. в большинстве случаев распространяют горение при вертикальном расположении образцов [16]. При этом устойчивое распространение горения наблюдается при распо-

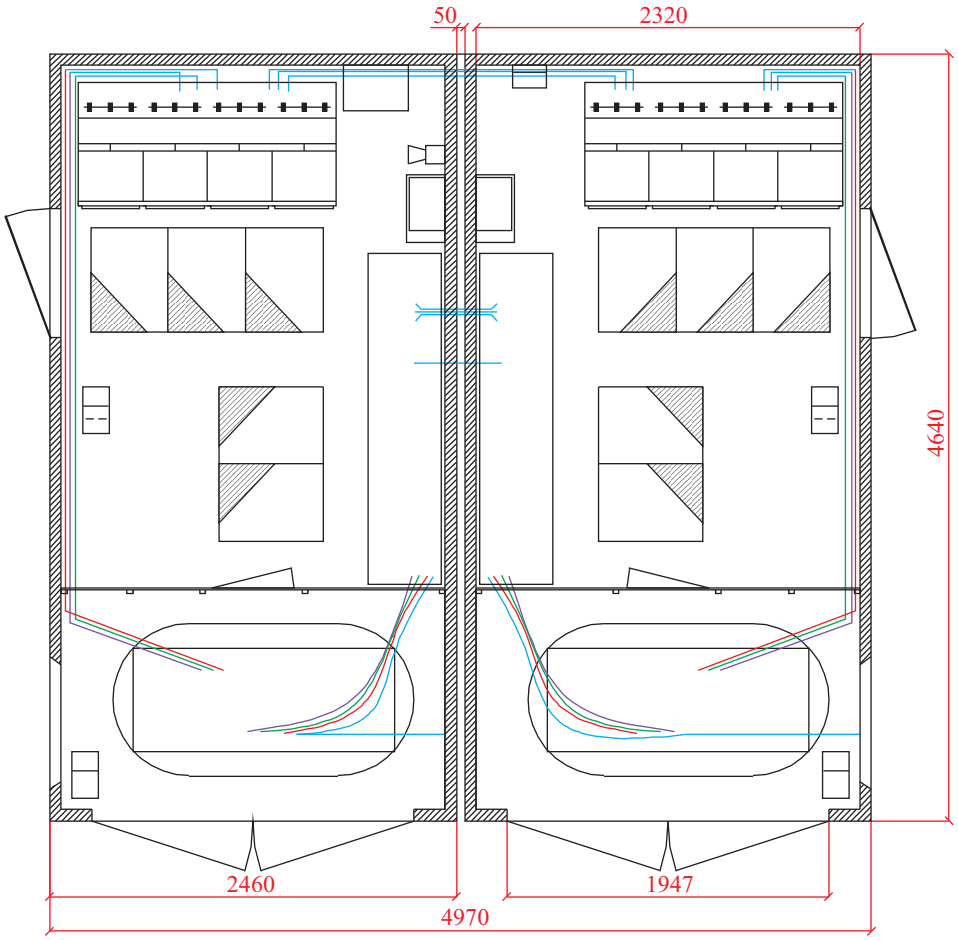


Рис. 1. Общий вид и внутреннее устройство 2БКТП-1000кВА
Fig. 1. General view and internal design of transformer substation 2BKTP (1,000 kVA)

ложении кабелей в пучке с зазором. Кроме того, на распространение пламени по поверхности кабеля влияет состав его полимерной оплетки и ее состояние [17, 18]. В местах прохода кабельных линий через ограждающие конструкции образовавшиеся зазоры должны герметизироваться негорючими материалами (пенами, герметиками).

Предполагается, что тушение горящих кабелей в помещении трансформаторной подстанции высотой h_0 происходит после заполнения его пеной до высоты $h = 0{,}8h_0$, и когда небольшой слой пены сформировался одновременно на всей поверхности помещения. Подаваемая в помещение пена, равномерно растекаясь, повышает толщину слоя и разрушается от соприкосновения с горящей поверхностью кабельных изделий [19].

Материальный баланс, описывающий процесс тушения воспламенения пеной, можно представить в виде двух частей: части пены, разрушаемой после соприкосновения с поверхностью горящих кабельных изделий, и частью накопившегося слоя пены:

$$q d\tau = U S_{к} d\tau + \rho_f h_f dS_0, \quad (1)$$

где q — расход пены, кг/с;

τ — время тушения, с;

U — удельная скорость разрушения пены от контакта с горящими кабелями, кг/(м^2·с);

$S_к$ — площадь поверхности горящих кабелей, м^2;

ρ_f — плотность пены, кг/м^3;

h_f — высота слоя пены, м;

S_0 — площадь пола помещения, м^2.

Площадь поверхности воспламенившихся кабелей рассчитывается по формуле:

$$S_{к} = Lh, \quad (2)$$

где h — высота прокладки кабеля, м;

L — длина участка с кабелем, м.

При составлении уравнения сохранения массы пены необходимо учесть потери пены в процессе разрушения от контакта с горящим кабелем, а также определить зависимость времени тушения и удельного расхода пены от интенсивности подачи пены.

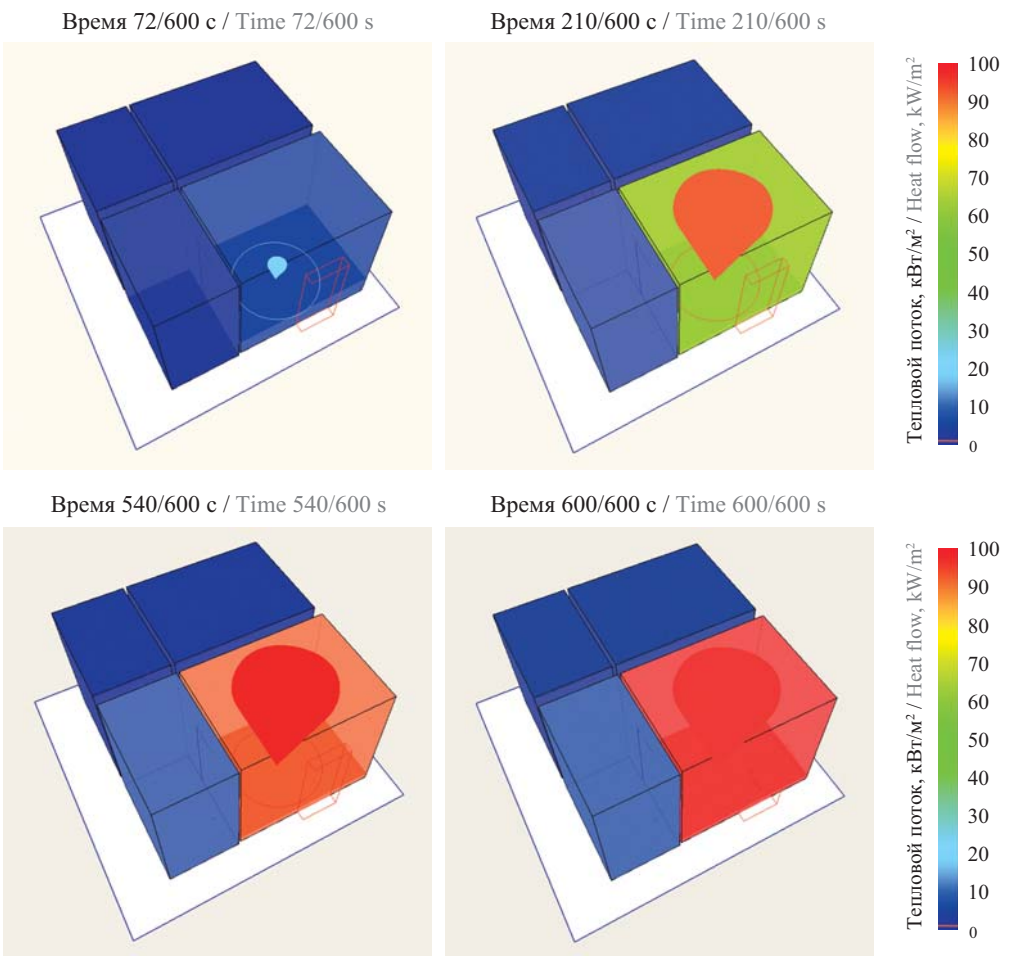


Рис. 2. Визуализация развития мощности пожара в помещении распределительных устройств путем моделирования в программном комплексе СИТИС (блок 4.11.17130-ИСМ)

Fig. 2. Visual representation of fire intensity growth inside a switch house performed by means of fire simulation using SITIS software: Block 4.11.17130-ISM

Решая уравнение материального баланса (1) с учетом формулы (2) и начальных условий $\tau = 0$; $S_к = 0$, получим следующую формулу:

$$\tau = \frac{\rho_f h_f}{U} - \frac{q\rho_f}{U^2 L}\ln\left(1 - \frac{LhU}{q}\right). \quad (3)$$

Учитывая баланс тепла от нагретой поверхности и затраты тепла на испарение, удельная скорость термического разрушения пены от контакта с нагретой поверхностью кабелей может быть представлена в следующем виде:

$$U = \alpha K S_w \ln\left(\frac{T_г - T_0}{Q_в}\right), \quad (4)$$

где α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·с);

S_w — площадь поверхности стены, м²;

$T_г$ — температура горящей поверхности кабеля, К;

T_0 — температура водного раствора, К;

$Q_в$ — удельный расход тепла на испарение воды, кДж/кг;

Кратность пены:

$$K = \frac{S_{к'}}{S_{0'}}, \quad (5)$$

где $S_{к'}$ — площадь одного кабеля, м², рассчитывается как произведение площади окружности кабеля на длину участка с кабелем L, м, и количество образцов кабельной продукции n:

$$S_{к'} = 2\pi RLn; \quad (6)$$

$S_{0'}$ — площадь пола под одним кабелем, м².

Подставляя в формулу (3) такой параметр, как интенсивность J, и меняя $q/L \equiv Ja$, где a — ширина помещения, м, получаем время тушения, в формуле для расчета которого интенсивность относится к площади пола, а не к стенам:

$$\tau = -\frac{\rho_f h_f}{J_{кр}} - \frac{Ja\rho_f}{J_{кр}^2}\ln\left(1 - \frac{J_{кр}}{J}\right), \quad (7)$$

где $J_{кр}$ — критическая интенсивность подачи пены, кг/(м²·с).

№ п/п No.	Кратность K Expansion rate K	ρ, кг/м^3 ρ, kg/m^3	h_0, м h_0, m	U, кг/(м^2·с) U, kg/(m^2·s)	q, кг/с q, kg/s	l, м l, m	Интенсивность J Foam application rate J	τ, с τ, s	Удельный расход Q Specific consumption Q
1	450	1,000	3,6	0,02	1	9,1	0,031	250,1	7,63
2	450	1,000	3,6	0,02	2	9,1	0,061	84,6	5,17
3	450	1,000	3,6	0,02	3	9,1	0,092	51,3	4,70
4	450	1,000	3,6	0,02	4	9,1	0,122	36,8	4,50
5	450	1,000	3,6	0,02	5	9,1	0,153	28,7	4,39
6	450	1,000	3,6	0,02	6	9,1	0,183	23,6	4,32

Умножив время тушения на интенсивность подачи пены, получим удельный расход водного раствора пенообразователя, который будет затрачен на тушение пламени горящих кабелей:

$$Q = -J\left[\frac{\rho_f h_f}{J_{кр}} - \frac{Ja\rho_f}{J_{кр}^{\,2}}\ln\left(1-\frac{J_{кр}}{J}\right)\right]. \qquad (8)$$

Перечень исходных данных для расчета приведен в таблице.

Результаты исследования

Результаты расчета по формулам (7) и (8), представленные на рис. 3, показывают, что время тушения экспоненциально снижается с ростом интенсивности подачи пены. Используя результаты расчета, удается выбрать оптимальное количество генераторов пены.

Выводы

Основными расчетными величинами для определения зависимости времени тушения кабельного сооружения и удельного расхода высокократной пены являются: $S_к$ — площадь поверхности кабелей; U — удельная скорость разрушения пены от контакта с горящими кабелями; q — расход пены.

Рассчитаны зависимости времени тушения и удельного расхода по разработанной методике. Установлено, что оптимальный режим тушения соответствует следующим характеристикам: интенсивность подачи пены – 0,183 м^3/ (м^2·с); удельный расход водного раствора пенообразователя — 4,32 кг/м^2.

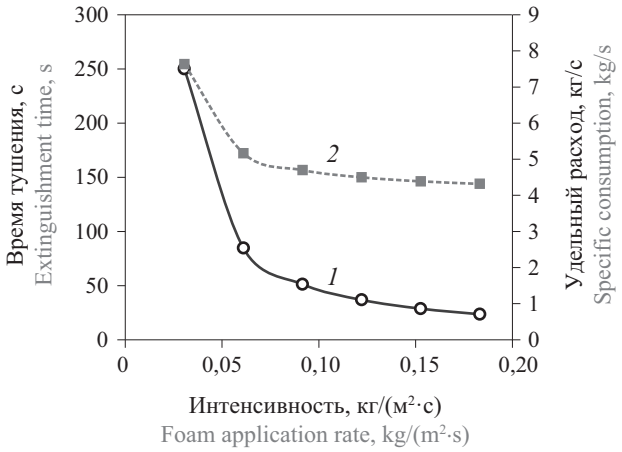


Рис. 3. Зависимость расчетного времени тушения (*1*) и удельного расхода (*2*) в помещении КТП от интенсивности подачи пены высокой кратности. Результаты расчета по формулам (7) и (8)

Fig. 3. Dependence between estimated extinguishment time (*1*), specific foam consumption (*2*) inside the packaged transformer substation and high-expansion foam application rate, calculated using formulas (7) and (8)

Пеной высокой кратности можно тушить пожары установок под электрическим током, поскольку пена мгновенно разрывает контакт с системой, по которой течет ток. Кроме этого, пена высокой кратности имеет высокое электрическое сопротивление, что делает ее применение безопасным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кашолкин Б.И., Мешалкин Е.А.* Тушение пожаров в электроустановках. М. : Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
2. *Андросова И.Г., Зуева Н.А., Лупанов С.А., Сибирко В.И., Фирсов А.Г., Чабан Н.Г. и др.* Пожары и пожарная безопасность в 2013 году: Статистический сборник / под общ. ред. В.И. Климкина. М. : ВНИИПО, 2014. 137 с.
3. *Сибирко В.И., Кондашов А.А., Чабан Н.Г.* Общая характеристика обстановки с пожарами, произошедшими на объектах экономики Российской Федерации в 2011–2015 годах // Вопросы статистики. 2017. № 1. С. 75–88. URL: https://voprstat.elpub.ru/jour/article/view/444?locale=ru_RU

4. *Григорьева М.М., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* Оценка пожарной опасности режимов электрической перегрузки кабельных линий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 9. С. 9–13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902930
5. *Королев И.В., Кондратьева О.Е., Валуев П.В., Локтионов О.А*. Анализ целесообразности применения устройств обнаружения дугового пробоя для комплексной защиты от пожаров, вызванных неисправностями электрооборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 47 (2). С. 108.
6. *Валуев П.В., Смирнов М.И., Королев И.В.* О благоприятном влиянии НПА в области применения AFCI технологий на позитивный тренд по борьбе с электрическими пожарами // Студенческий электрон. науч. журн. 2019. № 1 (45). С. 38–45.
7. *Campbell R*. NFPA research — electrical fires // NFPA, 2017. Pp. 5, 12, 13.
8. *Барботько С.Л.* Моделирование процесса горения материалов при испытаниях по оценке тепловыделения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 3. С. 10–24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512010
9. *Huiqing Zhang.* Fire-safe polymers and polymer composites. Technical Report DOT/FAA/AR-04/11. Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center Airport and Aircraft Safety, 2004. 209 p.
10. *Смелков Г.И.* Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «КАБЕЛЬ», 2009. 328 с.
11. *Keski-Rahkonen O., Mans J., Turtola A.* Ignition of and fire spread on cables and electronic components. URL: https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P387.pdf (дата обращения: 30.12.2018).
12. *Keski-Rahkonen O.* Effect of electrical conductivity on emergency performance of cables at high temperatures // Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Prague, 2003. Pp. 462–466.
13. *Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Бедретдинов Р.Ш.* Исследование воздействия цифровой транформаторной подстанции на условия труда обслуживающего персонала // Фундаментальные исследования. 2015. № 5–1. С. 143–148. URL: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38023
14. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя : в 3-х т. Т. 1. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. Жестковой И.Н. М. : Машиностроение, 2001. 920 с.
15. *Хасанов И.Р., Варламкин А.А.* Влияние конструкции кабельных проходок на их пожарную опасность при эксплуатации // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С. 46–51. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-46-51
16. *Smith E.E.* Measuring rate of heat, smoke and toxic gas release // Fire Technology. 1972. Vol. 8. Issue 3. Pp. 237–245. DOI: 10.1007/bf02590547
17. *Хасанов И.Р., Варламкин А.А.* Экспериментальные методы определения огнестойкости кабельных проходок при пожаре с учетом влияния токов нагрузки // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций : сб. мат. XVII науч.-практ. конф. М. : ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2018. С. 77–78.
18. *Tamus Z.Á., Szedenik N.* Investigation of temperature dependence of dielectric processes in thermally aged PVC insulation // Journal of Electrostatics. 2013. No. 71 (3). Pp. 462–466. DOI: 10.1016/j.elstat.2013.01.003
19. *Овсянников Е.А., Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Тушение пожара в кабельных сооружениях полидисперсной пеной высокой кратности // Пожарная безопасность. 2016. № 2. С. 94–98.

REFERENCES

1. Kasholkin B.I., Meshalkin E.A. *Extinguishing fires in electrical installations*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985; 112. (rus).
2. Androsova I.G., Zueva N.A., Lupanov S.A., Sibirko V.I., Firsov A.G., Chaban N.G. et al. *Fires and fire safety in 2013: Statistical compendium* / V.I. Klimkin (ed.). Moscow, VNIIPO Publ., 2014; 37. (rus).
3. Sibirko V.I., Kondrashov A.A., Chaban N.G. General characteristics of the situation with fires that occurred at the facilities of the Russian economy in 2011-2015. *Voprosy statistiki*. 2017; 1:75-88. URL: https://voprstat.elpub.ru/jour/article/view/444?locale=ru_RU (rus).
4. Grigorieva M.M., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. A fire risk assessment of cable lines on overload. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(9):9-13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902930 (rus).
5. Korolev I.V., Kondratieva O.E., Valuev P.V., Loktionov O.A. Analysis of advisability of arc breakdown detectors for integrated protection from fires caused by failures of electrical equipment. *Electric power. Transmission and distribution*. 2018; 47(2):108. (rus).

6. Valuev P.V., Smirnov M.I., Korolev I.V. On the positive impact of the NPA in the field of AFCI technologies on the positive trend in the fight against electric fires. *Student*. 2019; 1(45):38-45. (rus).
7. Richard Campbell. NFPA RESEARCH — Electrical fires. *NFPA*. 2017; 5, 12, 13.
8. Barbotko S.L. Modeling of the Gorenje process of materials in tests for heat release estimation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(3):10-24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512010 (rus).
9. Huiqing Zhang. Fire-Safe Polymers and Polymer Composites. *Technical Report DOT/FAA/AR-04/11. Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center Airport and Aircraft Safety*, 2004; 209.
10. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical wiring*. Moscow, LLC "CABLE" Publ., 2009; 328. (rus).
11. Keski-Rahkonen O., Mans J., Turtola A. *Ignition of and fire spread on cables and electronic components*. URL: https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P387.pdf (Accessed: 30.12.2018).
12. Keski-Rahkonen O. Effect of electrical conductivity on emergency performance of cables at high temperatures. *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Prague, 2003; 462-466.
13. Sosnina E.N., Masleeva O.V., Pachurin G.V., Bedretdinov R.Sh. Study of the impact of digital transformer substation on the working conditions of service personnel. *Fundamental research*. 2015; 5-1:143-148. URL: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38023 (rus).
14. Anuriev V.I. *Reference book of the designer-machine-Builder* : in 3 vols. Vol. 1. 8th edition, revised and expanded / I.N. Zhestkova (ed.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001; 920. (rus).
15. Khasanov I.R., Varlamkin A.A. Effect of the structure of cable penetrations on their fire hazard during operation. *Occupational Safety in Industry*. 2019; 3:46-51. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-46-51 (rus).
16. Smith E.E. Measuring rate of heat, smoke and toxic gas release. *Fire Technology*. 1972; 8(3):237-245. DOI: 10.1007/bf02590547
17. Khasanov I.R., Varlamkin A.A. Experimental methods for determining the fire resistance of cable penetrations in case of fire, taking into account the influence of load currents. *Problems of forecasting emergency situations : collection of materials of the XVII scientific and practical conference*. Moscow, FKU Center "Antistikha" EMERCOM of Russia, 2018; 77-78. (rus).
18. Tamus Z.Á., Szedenik N. Investigation of temperature dependence of dielectric processes in thermally aged PVC insulation. *Journal of Electrostatics*. 2013; 71(3):462-466. DOI: 10.1016/j.elstat. 2013.01.003
19. Ovsyannikov E.A., Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. The fire extinguishing in cable works by means of polydisperse high-expansion foam. *Fire Safety*. 2016; 2:94-98. (rus).

Поступила 03.11.2020, после доработки 02.12.2020; принята к публикации 10.12.2020
Received November 3, 2020; Received in revised form December 2, 2020; Accepted December 10, 2020

Информация об авторах

ОВСЯННИКОВ Евгений Александрович, технический директор, ООО «ПИРОТЕК»; аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 886773; ORCID: 0000-0003-0464-9790; email: getone@mail.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

СЕМИКОВ Владимир Леонтьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, профессор кафедры менеджмента и экономики Научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 432977; e-mail: info@academygps.ru

Information about the authors

Evgeniy A. OVSYANNIKOV, Technical Director, PIROTEK Ltd; Postgraduate Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 886773; ORCID: 0000-0003-0464-9790; email: getone@mail.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Vladimir L. SEMIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Professor of Department of Management and Economics of Scientific and Educational Complex of Organizational and Managerial Problems of GPS, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 432977; e-mail: info@academygps.ru

УДК 614.841/ 614.838

Электропроводка в пожароопасных зонах

© **А.С. Харламенков** ✉

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

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены общие принципы выбора проводов и кабелей для пожароопасных зон. Проведен анализ действующих нормативных документов, определяющих порядок применения кабельных изделий в пожароопасных средах. Представлена информация о безопасных способах монтажа электропроводки. Отмечена необходимость поиска технических и организационных решений, позволяющих определить порядок осуществления государственного пожарного надзора за безопасным состоянием электрических сетей зданий и сооружений. Показаны примеры марок кабельных изделий, отвечающих требованиям норм их прокладки в пожароопасных зонах.

Ключевые слова: источник зажигания; ограничение распространения горения; короткое замыкание; джоулево тепло; горючие жидкости; горючие пыли; твердые горючие вещества

Для цитирования: *Харламенков А.С.* Электропроводка в пожароопасных зонах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 91-94.

✉ *Харламенков Александр Сергеевич*, e-mail: h_a_s@live.ru

Electrical wiring in fire hazardous areas

© **Aleksandr S. Kharlamenkov** ✉

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

ABSTRACT

The general principles that govern the selection of wires and cables for fire hazardous areas are considered. The analysis of effective regulatory documents, governing the use of cable products in fire hazardous environments is performed. The information on safe wiring methods is provided. The need for technical and organizational solutions, governing the state fire supervision over the safe condition of electric power networks of buildings and structures, is highlighted. Examples of the cable grades, that comply with the wiring standards in fire hazardous areas, are provided.

Keywords: ignition source; fire containment; short circuit; Joule heating; flammable liquids; combustible dusts; flammable solids

For citation: A.S. Kharlamenkov. Electrical wiring in fire hazardous areas. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):91-94 (rus.).

✉ *Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov*, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС:

Статистические данные о пожарах в РФ за 2019 г. [1] показывают, что по причине нарушения устройства и эксплуатации электрооборудования происходит 34 % пожаров. Бóльшая их часть (более 60 %) приходится на провода и кабели. Из-за неправильного монтажа, механического повреждения, старения изоляции, отсутствия своевременного технического обслуживания и перегрузки кабельные изделия часто подвергаются опасности появления источников зажигания.

Такая тенденция сохраняется уже не первый год и продолжает свой рост. Этому способствует неопределенность в распределении зон ответственности между МЧС и Ростехнадзором РФ касательно исполнения государственной функции по надзору за обеспечением пожарной безопасности электроустановок напряжением до 1 кВ зданий с потребляемой суммарной мощностью до 150 кВт. Письмо МЧС РФ № 19-3-1-2086 от 2 июня 2011 г.[1], запрещающее инспекторам Федерального государственного пожарного надзора (ФГПН) обращаться к требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ)[2],

[1] Письмо МЧС РФ № 19-3-1-2086 от 2 июня 2011 г. «О применении ПТЭЭП, ПУЭ, СНИП».

[2] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 6-е изд. М. : Энергоатомиздат, 1986.

Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП)[3] и СНиП при проверках объектов, также усугубляет и без того сложную ситуацию. В конечном результате вся ответственность за надлежащее состояние электропроводки на объекте защиты возлагается на собственника. А так как его никто не контролирует, то он тоже в большинстве случаев бездействует и не принимает никаких мер по обеспечению пожарной безопасности электроустановок. Данный вопрос более подробно освещен в рубрике «Вопрос – Ответ» № 10 журнала за 2018 г. [2].

Представленные факты указывают на необходимость разработки действенных технических и организационных мер по обеспечению пожарной безопасности электроустановок и, в первую очередь, кабельных изделий на объектах защиты. Это касается не только электрических сетей общественных, административных и жилых зданий, но и промышленных объектов с пожаровзрывоопасными производствами.

Кабельно-проводниковая продукция пополняется новыми, более современными и безопасными образцами, позволяющими снизить пожарную опасность объекта и гибель людей. При этом не все варианты кабельных изделий пригодны для применения в местах скопления большого количества горючих веществ и материалов.

Какие кабельные изделия следует применять при выполнении электромонтажных работ в пожароопасных зонах?

ОТВЕТ:

В течение длительного времени основным документом, определяющим порядок выбора проводов и кабелей в пожароопасных и взрывоопасных зонах, были Правила устройства электроустановок. С развитием системы технического регулирования ПУЭ постепенно теряют свой первоначальный статус основополагающего документа в области проектирования и монтажа электроустановок. Отдельные главы ПУЭ превращаются в обособленные нормативные документы или включаются в разделы существующих ГОСТов и сводов правил. Такое разделение позволяет систематизировать информацию в рамках технического регулирования, но лишает специалистов и проектировщиков возможности видеть картину в целом.

В ст. 18 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности[4] (далее — № 123-ФЗ) классификация пожароопасных зон не претерпела значимых изменений, потому и основные требования гл. 7.4 ПУЭ «Электроустановки в пожароопасных зонах» остались прежними. Следует отметить, что в европейских и американских стандартах отсутствует понятие «пожароопасная зона» [3], поэтому прямое сравнение международного опыта с отечественным для данных классов помещений и пространств не представляется возможным.

Основные принципы выбора и монтажа электропроводок по условию ограничения распространения горения представлены в п. 527 ГОСТ Р 50571.5.52–2011[5]. Общий подход заключается в правильном подборе материалов и способов прокладки проводов и кабелей. Если кабельное изделие удовлетворяет условиям безопасности и имеет изоляцию и оболочку, не распространяющую горение, то его можно прокладывать открытым способом по строительным конструкциям объекта. Провода или кабели, не соответствующие требованиям по нераспространению горения, должны быть полностью заключены в оболочку из негорючих материалов. Для исключения перехода горения из одного помещения в другое все отверстия и кабельные проходки через стены, перегородки, полы, потолки и крыши должны иметь уплотнения (заделки) той же степени огнестойкости, как и у пересекаемого элемента строительной конструкции.

Помимо этого, в п. 6.11 СП 76.13330.2016[6], который устанавливает требования к производству электромонтажных и пусконаладочных работ в пожароопасных зонах, указано следующее:

- запрещается прокладка транзитных кабелей всех напряжений, проводов и кабелей в стальных трубах через пожароопасные зоны, а также на расстоянии ближе 1 м от их границ (при отсутствии особых указаний в рабочей документации);
- допускается применение всех видов шинопроводов напряжением до 1 кВ (с медными и алюминиевыми шинами);
- осветительные сети должны выполняться пяти- или трехпроводными;

[3] Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) : утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 13 июня 2003 г. № 6 с изменениями, внесенными приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 13 сентября 2018 г. № 757.

[4] Федеральный закон Российской Федерации «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в редакции от 27 декабря 2018 г.) от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ; принят Государственной Думой 4 июня 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июня 2008 г. Собр. законодательства РФ. 2008. № 30 (ч. I), ст. 3579.

[5] ГОСТ Р 50571.5.52–2011/МЭК 60364-5-52:2009. Электроустановки низковольтные. Часть 5–52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки (с Поправкой) в редакции от 1 августа 2018 г. : введен в действие 1 января 2013 г. М. : Стандартинформ, 2013.

[6] Электротехнические устройства (актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85) : (СП 76.13330.2016) : введен в действие 17 июня 2017 г. М. : Стандартинформ, 2017.

- в помещениях с наличием горючей пыли (зона П-II) рекомендуется применять методы прокладки, исключающие ее скопление на кабелях (с возможностью их очистки).

Также отмечено, что монтаж электрооборудования в пожароопасных зонах рекомендуется выполнять согласно требованиям Инструкции 1.02-09[7]. Электропроводка по данной Инструкции должна быть не распространяющей горение после воздействия на нее внешнего теплового источника, и в том числе джоулева тепла, которое выделяется при нагреве в местах контактных соединений проводников и при коротких замыканиях. Кабельные изделия также не должны быть источником зажигания строительных конструкций, на (в) которых они проложены.

В пожароопасных зонах разрешено применение проводов и кабелей с медными жилами сечением не менее 1,5 и 1,0 мм^2 для вторичных цепей. Алюминиевые жилы должны иметь сечение не менее 2,5 мм^2 за исключением электродвигателей, установленных на виброизолирующих опорах. Для их подключения вместо алюминиевых должны использоваться многопроволочные медные жилы.

В п. 6.1 Инструкции 1.02-09 указывается, что при открытой прокладке во всех классах пожароопасных зон следует применять провода и кабели, не распространяющие горения. Для класса зоны П-III — это кабели с индексом «нг» в маркировке, имеющие предел распространения горения при групповой прокладке ПРПГ1 (для категорий A F/R или A) по ГОСТ 31565–2012[8]. Для классов зон, расположенных в помещениях (П-I, П-II, П-IIa), должны применяться кабели с индексами «нг-LS», «нг-HF» и «нг-FR» с учетом рекомендаций табл. 2 ГОСТ 31565–2012.

Кабели и провода должны иметь круглую форму и категорию изоляции И-3 или И-4 по ГОСТ 23286-78[9]. Подключение осветительных сетей должно выполняться по системе TN-S, а силовые сети напряжением до 1 кВ допускается выполнять по системе TN-C. Применение кабелей овальной (плоской) формы запрещено, за исключением двужильных с гладкой внешней поверхностью без борозд и углублений. Маслонаполненные кабели и кабели с изоляцией, пропитанной маслоканифольными составами для прокладки в пожароопасных зонах, не допускаются.

Прокладку проводов с изоляцией категории И-4 следует осуществлять в стальных трубах и коробах (профильные трубы). Толщина стенок трубы выбирается в зависимости от площади сечения и материала жил по табл. 1 (см. табл. 6 Инструкции 1.02-09).

Для одиночной открытой прокладки проводку допускается выполнять в трубах из поливинилхлорида (ПВХ), не распространяющего горение. Применение труб из полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП) также возможно при наличии сертификата соответствия требованиям пожарной безопасности. В случае выполнения прокладки электропроводки в стальных коробах и трубах их концы должны быть уплотнены негорючими материалами.

Таблица 1. Локализационная способность стальных труб (Инструкция 1.02-09)

Сечение жил проводов, мм^2		Толщина стенки трубы, не менее, мм
медных	алюминиевых	
До 2,5	До 4	0,5
—	6	2,5
4	10	2,8
6 10	16 25	3,2
16	35 50	3,5
25 35	70	4,0

Допустимые способы прокладки проводов и кабелей в пожароопасных зонах представлены в табл. 2. (см. табл. 7 и прил. 5 Инструкции 1.02-09).

Области применения с указанием марок кабельных изделий представлены в прил. 2а Инструкции 1.02-09. Список может расширяться по мере появления новых образцов кабельных изделий, удовлетворяющих требованиям пожарной безопасности. Ниже представлено несколько примеров маркировок кабелей и проводов, применяемых в пожароопасных зонах, согласно Инструкции 1.02.09 и данным Информационно-технического сборника [4]:

- АВВГ (ВВГ), АВВГнг (ВВГнг), АВВГнг-LS (ВВГнг-LS);
- АПвВГ (ПвВГ), АПвВГнг-LS (ПвВГнг-LS);
- АВБбШв (ВБбШв), АВБбШнг (ВБбШнг), АВБбШвнг-LS (ВБбШвнг-LS);
- АПвВнг(А) нг-LS, (ПвВнг(А) нг-LS), АПвБбШнг(А)-LS;
- АВБВнг-LS (ВБВнг-LS), АПвБВнг-LS (ПвБВнг-LS);
- АСБВнг-LS (СБВнг-LS), ЦСБВнг-LS (ЦАСБВнг-LS);
- АПВ, ПВ-1, ПВ-3.

Таким образом, в пожароопасных зонах следует отдавать предпочтение открытой прокладке небронированных, не распространяющих горение кабелей с защитой их монтажными профилями или трубами в необходимых местах от механических воздействий и непосредственного попадания на них горючих и химически активных веществ.

[7] И 1.02-09. Инструкция по монтажу электрооборудования в пожароопасных зонах : введена в действие 19 августа 2009 г. М. : Ассоциация «Росэлектромонтаж», 2009.

[8] ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности : введен в действие 1 января 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

[9] ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности : введен в действие 1 января 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

Таблица 2. Допустимые способы прокладки проводов и кабелей в пожароопасных зонах

Провода и кабели	Способ монтажа						
	С непосредственным креплением	В металлических трубах		В металлических коробах	В нераспространяющей горение пластмассовой арматуре	На лотках и кронштейнах	На тросе
		в специальных коробах*	с локализационной способностью				
Изолированные провода	–	–	++	+	–	–	–
Изолированные провода в защитной оболочке и кабели (многожильные и одножильные)	–	++	++	+	–	–	–
Кабели в исполнении «нг» — LS, HF, FR	++	++	#	++	++	++	++

*Специальный короб — короб прямоугольного сечения, предназначенный для прокладки проводов и кабелей, не имеющий съемных или открывающихся крышек.

Примечание:
++ — разрешается;
+ — разрешается при условии выполнения противопожарных мероприятий, препятствующих распространению горения внутри короба;
– — не разрешается;
— не применяется или обычно в практике не используется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.

2. *Харламенков А.С.* Надзор за обеспечением пожарной безопасности электроустановок // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 10. С. 76–78. URL: https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/705

3. *Черкасов В.Н., Зыков В.И.* Пожарная безопасность электроустановок : учебник / под общ. ред. В.Н. Черкасова. 5-е изд. перераб. и доп. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 391 с.

4. Изделия кабельные. Том 1. Кабели, провода и шнуры силовые. Часть 1: информационно-технический сборник. М. : ОАО ВНИИКП, 2004. 225 с.

Материал поступил в редакцию 01.12.2020
Received December 1, 2020

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ 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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2020 г.

А

Акперов Р.Г. см. Пузач С.В.

Алешков М.В., Иощенко Д.А., Ольховский И.А. Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения, № 5, 51

Андрюшкин А.Ю., Афанасьев Е.О., Кадочникова Е.Н. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ, № 2, 53

Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов, № 5, 71

Асеева Р.М. см. Круглов Е.Ю.

Афанасьев Е.О. см. Андрюшкин А.Ю.

Б

Бабиков И.А. см. Танклевский Л.Т.

Беспалько С.В. см. Филиппов В.Н.

Богданова В.В., Кобец О.И. Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор), № 6, 5

Буцынская Т.А. см. Членов А.Н.

В

Виноградов А.В. см. Гаращенко А.Н.

Вогман Л.П., Корольченко Д.А., Хрюкин А.В. Определение условий самовозгорания отложений горючих пылей на оборудовании, в вентиляционных системах и аспирационных установках зданий и сооружений, № 4, 32

Г

Гайнуллина Е.В. см. Кокшаров А.В.

Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даштиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева, № 6, 28

Гвоздев Е.В. Методология динамического факторного воздействия служб на обеспечиваемые ими подсистемы безопасности, № 4, 15

Гвоздев Е.В. Методология синтеза адаптивной системы комплексной безопасности на предприятии жизнеобеспечения населения региона, № 2, 6

Годунов И.А. см. Архангельский И.В.

Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн, № 5, 82

Гравит М.В., Прусаков В.А., Коротин И.Г., Тимофеев Н.С., Симоненко Я.Б. Итумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита для конструкций и кабельных линий, № 3, 18

Д

Далнер Д. см. Станкевич Т.С.

Даштиев И.З. см. Гаращенко А.Н.

Дементьев Ф.А. см. Иванов А.В.

Е

Евич А.А. см. Поландов Ю.Х.

Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров, № 3, 44

Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А., Портнов Ф.А. Использование диаграмм совместимости для оптимизации исследования огнезащитных материалов, № 6, 40

Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А. Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий, № 2, 34

З

Захматов В.Д., Чернышов М.В., Щербак Н.В. О возможности использования новой импульсной пожарной техники для качественно новой крупномасштабной дезинфекции, № 4, 60

Звонов Ю.Н. см. Тамразян А.Г.

Зыков В.И. см. Лебедченко О.С.

И

Иванов А.В., Столяров С.О., Дементьев Ф.А., Ферулев А.П. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами, № 1, 55

Иощенко Д.А. см. Алешков М.В.

К

Кадочникова Е.Н. см. Андрюшкин А.Ю.

Карпов А.В. см. Хасанов И.Р.

Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени, № 5, 89
Кобец О.И. см. Богданова В.В.
Кобылков Н.В. см. Гаращенко А.Н.
Козинда З.Ю. см. Цариченко С.Г.
Кокшаров А.В., Осипенко С.И., Гайнуллина Е.В. Исследование термической устойчивости пены различной кратности, № 3, 103
Колесников В.В. см. Цариченко С.Г.
Константинова Н.И. см. Цариченко С.Г.
Константинова Н.И. см. Шебеко А.Ю.
Корольченко Д.А. см. Вогман Л.П.
Корольченко Д.А. см. Еремина Т.Ю., № 3
Корольченко Д.А. см. Еремина Т.Ю., № 6
Корольченко Д.А. см. Овсянников Е.А.
Корольченко Д.А. см. Поландов Ю.Х.
Коротин И.Г. см. Гравит М.В.
Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. Беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения, № 1, 43
Крючков А.В. см. Самарин И.В.
Кудрявцев А.А. см. Умрихина М.Ю.

Л

Лебедченко О.С., Зыков В.И., Пузач С.В. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара, № 4, 51
Лобова С.Ф. см. Хасанов И.Р.

М

Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия, № 3, 54
Мусиенко Т.В. см. Смирнова А.А.
Мустафин В.М. см. Пузач С.В.

Н

Нагановский Ю.К. см. Архангельский И.В.
Недобитков А.И. Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке, № 2, 17
Недобитков А.И. О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети с напряжением 12 В, № 6, 50
Немченко С.Б. см. Смирнова А.А.
Немчинов С.Г. см. Горбань Ю.И.

О

Овсянников Е.А., Корольченко Д.А., Семиков В.Л. Тушение комплектных трансформаторных подстанций генераторами пены высокой кратности, № 6, 84
Ольховский И.А. см. Алешков М.В.
Осипенко С.И. см. Кокшаров А.В.

П

Парфененко А.П. см. Холщевников В.В.
Петров Г.И. см. Филиппов В.Н.
Петрова Н.В. см. Хасанов И.Р.
Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные, № 1, 9
Портнов Ф.А. см. Еремина Т.Ю., № 3
Портнов Ф.А. см. Еремина Т.Ю., № 6
Прокофьева С.М. см. Смирнова А.А.
Прусаков В.А. см. Гравит М.В.
Пузач С.В. см. Лебедченко О.С.
Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины, № 1, 23
Пьянкова Л.А. см. Умрихина М.Ю.

С

Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов, № 6, 61
Самарин И.В. Управление пожаровзрывобезопасностью на объектах ТЭК в особых условиях, № 2, 44
Сергеев И.К. см. Филиппов В.Н.
Симоненко Я.Б. см. Гравит М.В.
Смирнова А.А., Немченко С.Б., Прокофьева С.М., Мусиенко Т.В., Титова Е.А. О проекте пожарной реформы в России А.Д. Шереметева, № 4, 6
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, № 5, 13
Столяров С.О. см. Иванов А.В.
Строгонов А.Ю. см. Самарин И.В.

Т

Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н. К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара, № 2, 26
Танклевский Л.Т., Бабиков И.А., Таранцев А.А. Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении, № 3, 33

Таранцев А.А. см. Танклевский Л.Т.
Терехов С.А. см. Гаращенко А.Н.
Тимофеев В.Д. Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности, № 1, 69
Тимофеев Н.С. см. Гравит М.В.
Титова Е.А. см. Смирнова А.А.
Томитчек А. см. Станкевич Т.С.
Трчка М. см. Станкевич Т.С.

У

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, № 5, 60
Уткин С.В. см. Умрихина М.Ю.

Ф

Ферулев А.П. см. Иванов А.В.
Филиппов В.Н., Петров Г.И., Шебеко Ю.Н., Беспалько С.В., Сергеев И.К. Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов (СУГ), № 6, 75

Х

Харламенков А.С. Избыточное давление 5 кПа при категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности, № 3, 105
Харламенков А.С. Оценка риска в проектировании систем молниезащиты зданий и сооружений, № 5, 100
Харламенков А.С. Пути решения проблемы взрывов бытового газа в жилых домах, № 4, 72
Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2, № 1, 89
Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 3, № 2, 63
Харламенков А.С. Электропроводка в пожароопасных зонах, № 6, 91
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, № 5, 40
Холщевников В.В., Парфененко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь, № 3, 66
Хрюкин А.В. см. Вогман Л.П.

Ц

Цариченко С.Г., Колесников В.В., Константинова Н.И., Козинда З.Ю. Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности материалов внутренних конструкционных элементов специальных автомобилей, № 3, 6
Цариченко С.Г. см. Шебеко А.Ю.

Ч

Чернышов М.В. см. Захматов В.Д.
Членов А.Н., Буцынская Т.А. Оценка эффективности применения видеонаблюдения в системах противопожарной защиты, № 3, 95

Ш

Шебеко Ю.Н. Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики, № 5, 5
Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций, № 4, 42
Шебеко А.Ю., Константинова Н.И., Цариченко С.Г. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта, № 1, 32
Шебеко Ю.Н. см. Филиппов В.Н.
Шорникова О.Н. см. Архангельский И.В.
Шорохова Т.О. см. Умрихина М.Ю.

Щ

Щербак Н.В. см. Захматов В.Д.

Я

Яшин Н.В. см. Архангельский И.В.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2020 г.

Фамилии авторов и название статей	Номер журнала	Стр.
НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ		
I Международная научно-практическая конференция “Огнезащита материалов и конструкций”, Россия, г. Санкт-Петербург, 20–24 апреля 2020 г.	1	5
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ		
Смирнова А.А., Немченко С.Б., Прокофьева С.М., Мусиенко Т.В., Титова Е.А. О проекте пожарной реформы в России А.Д. Шереметева	4	6
Шебеко Ю.Н. Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики	5	5
ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА		
Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные.	1	9
Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины	1	23
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.	5	13
БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ		
Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов.	5	71
Богданова В.В., Кобец О.И. Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор)	6	5
Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даштиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева	6	28
Гравит М.В., Прусаков В.А., Коротин И.Г., Тимофеев Н.С., Симоненко Я.Б. Итумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита для конструкций и кабельных линий	3	18
Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А., Портнов Ф.А. Использование диаграмм совместимости для оптимизации исследования огнезащитных материалов	6	40
Иванов А.В., Столяров С.О., Дементьев Ф.А., Ферулев А.П. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами	1	55
Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. Беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения	1	43
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	5	60
Цариченко С.Г., Колесников В.В., Константинова Н.И., Козинда З.Ю. Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности материалов внутренних конструкционных элементов специальных автомобилей.	3	6

Фамилии авторов и название статей	Номер журнала	Стр.
Шебеко А.Ю., Константинова Н.И., Цариченко С.Г. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта	1	32
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ		
Гвоздев Е.В. Методология динамического факторного воздействия служб на обеспечиваемые ими подсистемы безопасности	4	15
Гвоздев Е.В. Методология синтеза адаптивной системы комплексной безопасности на предприятии жизнеобеспечения населения региона	2	6
Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров	3	44
Танклевский Л.Т., Бабиков И.А., Таранцев А.А. Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении	3	33
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	5	40
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА		
Недобитков А.И. Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке	2	17
Недобитков А.И. О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети с напряжением 12 В	6	50
БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ		
Алешков М.В., Иощенко Д.А., Ольховский И.А. Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения	5	51
Вогман Л.П., Корольченко Д.А., Хрюкин А.В. Определение условий самовозгорания отложений горючих пылей на оборудовании, в вентиляционных системах и аспирационных установках зданий и сооружений	4	32
Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов	6	61
Филиппов В.Н., Петров Г.И., Шебеко Ю.Н., Беспалько С.В., Сергеев И.К. Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов (СУГ)	6	75
БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ		
Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А. Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий	2	34
Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия	3	54
Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н. К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара	2	26
Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций	4	42
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ		
Тимофеев В.Д. Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности	1	69

Фамилии авторов и название статей	Номер журнала	Стр.
Холщевников В.В., Парфененко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь	3	66
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА		
Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн	5	82
Лебедченко О.С., Зыков В.И., Пузач С.В. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара	4	51
Членов А.Н., Буцынская Т.А. Оценка эффективности применения видеонаблюдения в системах противопожарной защиты	3	95
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ		
Самарин И.В. Управление пожаровзрывобезопасностью на объектах ТЭК в особых условиях	2	44
СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ		
Андрюшкин А.Ю., Афанасьев Е.О., Кадочникова Е.Н. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ	2	53
Захматов В.Д., Чернышов М.В., Щербак Н.В. О возможности использования новой импульсной пожарной техники для качественно новой крупномасштабной дезинфекции	4	60
Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламеним	5	89
Кокшаров А.В., Осипенко С.И., Гайнуллина Е.В. Исследование термической устойчивости пены различной кратности	3	103
Овсянников Е.А., Корольченко Д.А., Семиков В.Л. Тушение комплектных трансформаторных подстанций генераторами пены высокой кратности	6	84
ВОПРОС-ОТВЕТ		
Харламенков А.С. Избыточное давление 5 кПа при категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности	3	105
Харламенков А.С. Оценка риска в проектировании систем молниезащиты зданий и сооружений	5	100
Харламенков А.С. Пути решения проблемы взрывов бытового газа в жилых домах	4	72
Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2	1	89
Харламенков А.С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 3	2	63
Харламенков А.С. Электропроводка в пожароопасных зонах	6	91

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

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

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Использованные в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;
- для рисунка: подрисуночной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристатейные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % об общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс http://www. dissercat.com.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристатейные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!