



**30** *Лет*



Для тех,  
кто сделал безопасность  
своей профессией

## УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет»

## Адрес:

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

Журнал издается с 1992 г.,  
периодичность — 6 номеров в год.

СМИ зарегистрировано Федеральной  
службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых  
коммуникаций — свидетельство  
ПИ № ФС 77-79402 от 2 ноября 2020 г.  
Префикс DOI: 10.22227

## РЕДАКЦИЯ:

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

## Адрес редакции:

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

## Адрес для переписки:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26,  
корп. 8

**Тел./факс:** +7 (495) 287-49-14  
доб. 14-23

**E-mail:** [info@fire-smi.ru](mailto:info@fire-smi.ru)

<https://www.fire-smi.ru>

Журнал включен в перечень ведущих  
рецензируемых научных журналов и изданий,  
рекомендованных ВАК России для публикации  
трудов соискателей ученых степеней,  
в Реферативный журнал и базы данных  
ВИНИТИ РАН, в базу данных Российского  
индекса научного цитирования (РИНЦ),  
в Справочно-библиографическую службу EBSCO.  
Сведения о журнале ежегодно публикуются  
в Международной справочной системе  
по периодическим и продолжающимся изданиям  
«Ulrich's Periodicals Directory». Переводные  
версии статей журнала входят в Международный  
реферативный журнал Chemical Abstracts.

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

Подписано в печать 26.12.2022.

Выход в свет 30.12.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии  
Издательства МИСИ – МГСУ

129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8.

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: [www.ro.wikipedia.org](http://www.ro.wikipedia.org),  
[www.pxhere.com](http://www.pxhere.com)

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

## ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

**Мольков В.В.**, д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбаби, Велико-  
британия)

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

**Вагнер П.**, д. т. н. (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Германия)

**Калач А.В.**, д. х. н., профессор (Воронежский государственный технический универ-  
ситет, Воронеж, Россия)

**Кузнецов С.В.**, д. ф.-м. н., профессор (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлин-  
ского Российской академии наук, Москва, Россия)

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

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

**Поландов Ю.Х.**, д. т. н., профессор (Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

**Таранцев А.А.**, д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко  
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

**Холщевников В.В.**, д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик  
ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (Академия  
Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

**Христов Б.**, д. т. н., профессор (Берлинский институт техники и экономики, Берлин,  
Германия)

**Челани А.** (Миланский технический университет, Милан, Италия)

**Чирик Р.М.**, д. т. н., профессор (Высшая техническая школа, Нови Сад, Сербия)

**Шебеко Ю.Н.**, д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (ВНИИПО МЧС России,  
Балашиха Московской обл., Россия)

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

# CONTENTS

## НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

## NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

Журналу «Пожаровзрывобезопасность» – 30 лет!

5 The Fire and Explosion Safety journal has turned thirty!

### ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

### COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ  
Зависимость динамики горения полиэтилена  
в 1-м<sup>3</sup> камере от дисперсности частиц

6 N.L. POLETAEV  
Dependence of polyethylene combustion dynamics  
in a 1 m<sup>3</sup> chamber on particle size

### БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

### SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

А.Н. ГАРАЩЕНКО, С.П. АНТОНОВ, А.В. ВИНОГРАДОВ  
Исследование теплотехнических характеристик  
и эффективности конструктивной огнезащиты на основе  
цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при  
воспроизведении условий высокотемпературного воздействия

13 A.N. GARASHCHENKO, S.P. ANTONOV, A.V. VINOGRADOV  
Studying the thermal characteristics and effectiveness  
of structural fire proofing made of PROSASK Firepanel  
cement boards by means of reproducing the high-  
temperature effect

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

### MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Т.Ю. ЕРЕМИНА,  
С.В. ПУЗАЧ, Ф.А. ПОРТНОВ  
Моделирование номограмм прогрева стальных  
конструкций с огнезащитными покрытиями различной  
толщины (на воде)

30 D.A. KOROLCHENKO, T.Yu. EREMINA,  
S.V. PUZACH, F.A. PORTNOV  
Simulation of nomograms showing the heating of steel  
structures with flame retardant coatings of different  
thicknesses (in the water)

Е.В. ГВОЗДЕВ  
Рационально-целевое развитие системы  
комплексной безопасности на предприятиях  
нефтегазового комплекса России

47 E.V. GVOZDEV  
On the rational targeted development of the integrated  
security system at the enterprises of the oil and gas complex  
of Russia

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

### ELECTRICAL ENGINEERING

С.В. ПУЗАЧ, О.С. ЛЕБЕДЧЕНКО,  
В.И. ЗЫКОВ, Т.И. ЧИСТЯКОВ  
Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей  
при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

56 S.V. PUZACH, O.S. LEBEDCHENKO,  
V.I. ZYKOV, T.I. CHISTYAKOV  
Operability evaluation of electrical wires and cables  
subjected to simultaneous fire and current loadings

### БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

### SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

А.П. ПАРФЕНЕНКО, А.Б. ТИМОФЕЕВ  
Исследование влияния климатических условий  
на прогрев внешней стенки резервуара СУГ

68 A.P. PARFENENKO, A.B. TIMOFEEV  
A study on the influence of climatic conditions on the heating  
of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank

А.А. КОМАРОВ, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Н.В. ГРОМОВ  
Экспериментальное определение эффективности  
остекления при аварийных взрывах внутри зданий

78 A.A. KOMAROV, D.A. KOROLCHENKO, N.V. GROMOV  
Experimental determination of glazing efficiency  
in case of indoor explosions caused by accidents

### СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

### STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

Г.К. ИВАХНЮК, Ю.Ю. ОСМОНОВ  
Статистический анализ аварий  
на автозаправочных комплексах (станциях)

91 G.K. IVAKHNYUK, Yu.Yu. OSMONOV  
Statistical analysis of accidents  
at filling stations

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2022 г.

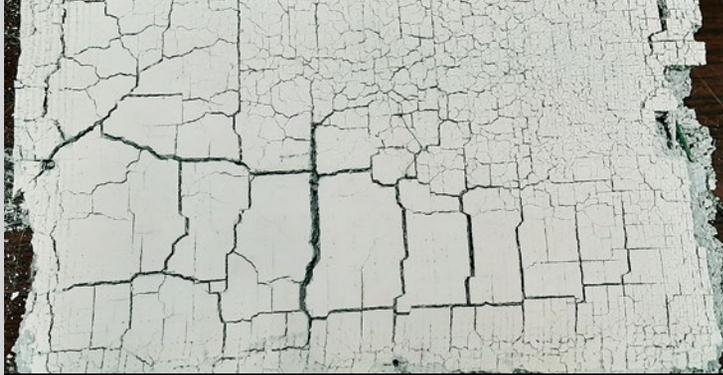
99 AUTHORS INDEX '2022

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2022 г.

102 GUIDE INDEX OF THE ARTICLES  
PUBLISHED IN 2022

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.



Исследование огнезащиты на основе цементных плит

▲ Стр. 13



◀ Стр. 30

Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций



Оценка работоспособности электрических проводов

▲ Стр. 56



◀ Стр. 78

Определение эффективности остекления при аварийных взрывах

Стр. 91 ▶



Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах

No. **6** VOL. **31**  
**2022**

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**EXPLOSION**



**FIRE AND SAFETY**

ПОЖАРОВЗРЫВ БЕЗОПАСНОСТ

**FOUNDER and PUBLISHER —**

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

**Address:**

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,  
129337, Russia

Journal founded in 1992,  
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal  
Service for Supervision of Communications,  
Information Technology, and Mass Media  
of Russia. Registration certificate PI  
No. FS 77-79402 on November 2, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

**EDITORIAL STAFF:**

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova A.G.**

**Address of Editorial Staff:**

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,  
129337, Russia

**Corresponding to:** Yaroslavskoe Shosse,  
26/8, Moscow, 121352, Russia.

**Phone/Fax:** +7 (495) 287-49-14  
add. 14-23.

**E-mail:** info@fire-smi.ru

**https://www.fire-smi.ru**

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

No part of this publication may be used  
or reproduced in any form or by any means  
without the prior permission of the Publishers.  
Reproducing any part of this material a reference  
to the journal is obligatory.  
Authors and advertisers account for contents  
of given papers and for publishing in the open  
press.

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

Signed for printing 26.12.2022.

Date of publication 30.12.2022.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house  
MISI – MGSU

building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,  
Russian Federation, 129337.

**EDITOR-IN-CHIEF:**

**D.A. Korolchenko**, Dr. 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)

**P. Wagner**, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)

**A.V. Kalach**, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Voronezh State Technical University, Voronezh,  
Russia)

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

**V.N. Lozhkin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Saint Petersburg University of State Fire Service of  
Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russia)

**I.G. Malygin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of  
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

**Yu.Kh. Polandov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor (National Research Moscow State University of  
Civil Engineering, Moscow, Russia)

**S.V. Puzach**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of National Academy of  
Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

**K.Zh. Raimbekov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (Kokshetau Technical Institute, Committee  
of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan,  
Kokshetau, Kazakhstan)

**A. Restas**, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management,  
Budapest, Hungary)

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

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

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

**V.V. Kholshchevnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member  
of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for  
Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (State Fire  
Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

**B. Hristov**, Dr. Ing., Professor (University of Applied Sciences, Berlin, Germany)

**A. Celani** (Polytechnic University of Milan, Milan, Italy)

**R.M. Ciric**, Ph. D., Professor (The Higher Technical School of Professional Studies, Novi  
Sad, Serbia)

**Yu.N. Shebeko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Sci-  
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,  
Moscow Region, Russia)

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

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

# 30 *Летие журнала* ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



**В 2022 году журнал  
«Пожаровзрывобезопасность»  
отмечает свой 30-летний юбилей!**

В течение всего этого времени наше издание рассказывает о задачах, проблемах, разработках, значимых проектах и достижениях в области комплексной безопасности, публикует актуальные статьи и результаты научных исследований, глубокие аналитические обзоры, мнения ведущих профессионалов по важнейшим вопросам пожарной безопасности, дискуссии на самые злободневные темы. К диалогу приглашает рубрика «Вопрос – ответ», в которой на вопросы читателей отвечают эксперты – главные специалисты отрасли.

Журнал «Пожаровзрывобезопасность» является общепризнанным научным изданием, печататься в котором не только престижно, но и важно для научных специалистов. Уже на протяжении многих лет наш журнал входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных высшей аттестационной комиссией (ВАК) для размещения результатов диссертационных исследований (ему присвоена категория К1), а также в российские и международные базы цитирования. Высокий научный авторитет журнала подтверждается и составом авторов, и большим количеством ссылок на публикации в отечественных и зарубежных книжных и периодических изданиях.

Гарантом компетентности нашего журнала и заслуженного уважения со стороны всего научного сообщества служит его редколлегия, в состав которой входят выдающиеся ученые России и стран ближнего и дальнего зарубежья, академики и доктора наук, специалисты-практики.

Редакция журнала всегда стремится соответствовать актуальным требованиям издательских стандартов, ищет новые формы работы с авторами, научно-исследовательскими институтами, проектными и учебными организациями, промышленными предприятиями.

Занимая лидирующие позиции в области комплексной безопасности, мы не будем останавливаться на достигнутом, а станем добиваться дальнейших научных успехов, расширять круг новых интересных тем и талантливых авторов. И конечно, журнал «Пожаровзрывобезопасность» будет и впредь следовать своему главному принципу — **работать для тех, кто сделал безопасность своей профессией!**

*Главный редактор*  
Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО

## Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере от дисперсности частиц

Николай Львович Поletaев ✉

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Результаты стандартного исследования взрывоопасности аэрозвесей полиэтилена (АВП) показывают, как взвеси могут способствовать развитию теории турбулентного горения АВП. Например, анализ сведений о полидисперсности и значениях бедного предела горения АВП в кубометровой камере позволил определить для полиэтилена максимальный размер взрывоопасных частиц  $d_{m,t}^* \approx 100$  мкм (Поletaев, 2014). В настоящей работе получена связь между динамикой горения АВП в 1-м<sup>3</sup> камере и средним размером частиц взвеси, под которым понимается средний размер частиц ее взрывоопасной фракции  $d_{50}^*$ .

**Исходные данные.** Использовались известные результаты исследования взрыва 28 образцов полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере. Непрерывные функции распределения частиц образцов по размерам, необходимые для расчета  $d_{50}^*$ , представлялись распределениями Розина – Раммлера.

**Динамика горения.** Динамика турбулентного горения АВП в 1-м<sup>3</sup> камере описывается максимальной скоростью выгорания аэрозвеси  $U_b$ . Расчет  $U_b$  производили по формуле (Kumar, 1992), предназначенной для газозвоздушных смесей, путем подстановки в эту формулу параметров взрыва АВП.

**Результат работы и его обсуждение.** Приведен график зависимости комплекса  $d_{50}^* U_b$  от  $d_{50}^*$ . Усредненное значение комплекса ( $\approx 45$  мкм · (м/с)) постоянно в диапазоне  $40$  мкм  $< d_{50}^* < 90$  мкм. Последнее свойственно для произведения размера частиц на нормальную скорость ламинарного пламени в жидких аэрозолях (Myers, 1986), что говорит о подобию влияния дисперсности частиц на динамику турбулентного и ламинарного горения упомянутых гетерогенных смесей.

**Выводы.** Дисперсность взрывоопасного полидисперсного образца полиэтилена определяется средним размером частиц взрывоопасной фракции образца  $d_{50}^*$ .

Подобие закономерностей горения указывает на близость механизмов распространения турбулентного пламени в АВП и ламинарного пламени в жидких аэрозолях.

**Ключевые слова:** пыль полиэтилена; взрывоопасная фракция; полидисперсность; турбулентность; механизм горения

**Для цитирования:** Поletaев Н.Л. Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере от дисперсности частиц // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 6–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.6-12

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

## Dependence of polyethylene combustion dynamics in a 1 m<sup>3</sup> chamber on particle size

Nikolay L. Poletaev ✉

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The results of a standard study on the explosion hazard of polyethylene air suspensions (PES) can contribute to the theory of turbulent combustion. For example, analysis of polydispersity data and values of the PES lean combustion limit in a 1 m<sup>3</sup> chamber helped to identify the maximum size of explosive particles  $d_{m,t}^* \approx 100$  μm (Poletaev, 2014). In this work, a relationship was obtained between the dynamics of PES combustion in a 1 m<sup>3</sup> chamber and the average particle size of the suspension, which is understood as the average particle size of its explosive fraction  $d_{50}^*$ .

**Initial data.** Well-known findings of a study on the explosion of 28 polyethylene specimens in a 1 m<sup>3</sup> chamber were used. Continuous functions of specimen particles distribution by size, necessary for calculating  $d_{50}^*$ , were represented using the Rosin-Rammler distribution.

**Combustion dynamics.** The dynamics of PES turbulent combustion in a 1 m<sup>3</sup> chamber is described by the maximum rate of air suspension burnout  $U_b$ .  $U_b$  was calculated according to the formula (Kumar, 1992) intended for gas-air mixtures by substituting PES explosion parameters into this formula.

**Results and its discussion.** The graph, describing the dependence of the complex  $d_{50}^* U_b$  on  $d_{50}^*$ , is provided. The averaged value of the complex ( $\approx 45 \mu\text{m} \cdot (\text{m/s})$ ) is constant in the range  $40 \mu\text{m} < d_{50}^* < 90 \mu\text{m}$ . The latter is typical for the product of the particle size and the normal velocity of laminar flame in liquid aerosols (Myers, 1986), which indicates similarity between the effect of particle dispersion and dynamics of turbulent and laminar combustion of the aforementioned heterogeneous mixtures.

**Conclusions.** The dispersive capacity of an explosive polydisperse polyethylene specimen is determined by the average particle size of the explosive fraction of the specimen  $d_{50}^*$ . The similarity of combustion patterns indicates the proximity of propagation mechanisms typical for turbulent flame, typical for PES, and laminar flame, typical for liquid aerosols.

**Keywords:** polyethylene dust; explosive fraction; polydispersity; turbulence; combustion mechanism

**For citation:** Poletaev N.L. Dependence of polyethylene combustion dynamics in a 1 m<sup>3</sup> chamber on particle size. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):6-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.6-12 (rus).

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

## Введение

Несмотря на то, что исследования горючести и взрывоопасности аэрозвеси полиэтилена (АВП) проводятся на протяжении более чем 50 лет [1, 2], взрывы АВП до сих пор представляют серьезную проблему для ряда отраслей промышленности. В частности, на заводах по производству полиолефинов в Китае каждые два года, начиная с 1986-го, происходило до 5 взрывов, которые приводили к серьезным жертвам и экономическим потерям [3]. Поскольку полиэтилен является важной разновидностью полиолефинов и его мировое производство занимает первое место среди пяти основных синтетических смол [4], совершенствование оценки взрывоопасности АВП и развитие представлений об особенностях взрыва АВП не теряют своей актуальности [5]. К одному из направлений этой работы относится анализ опубликованных результатов стандартного исследования взрывоопасности АВП в камере объемом  $V \approx 1 \text{ м}^3$ .

Опубликованные результаты, как правило, содержат по каждой из исследованных АВП информацию о распределении частиц взвеси по размеру и трех показателях взрыва [1], имеющих практическую значимость<sup>1, 2</sup>. Это — нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), максимальное избыточное давление взрыва  $P_{\text{max}}$  и индекс взрывоопасности  $K_{st}$  [1]. Последний представляет нормированную максимальную скорость нарастания давления взрыва  $K_{st} = V^{1/3}(dP/dt)_{\text{max}}$ .

Пример анализа сведений о дисперсном составе и значениях НКПР в 1-м<sup>3</sup> камере для нескольких полидисперсных образцов полиэтилена демонстри-

руется в работе [6]. В этой работе получена оценка максимального размера частиц (форму которых возможно аппроксимировать сферой), существенно влияющих на распространение турбулентного пламени по АВП. Данный размер частиц, обозначаемый в дальнейшем символами  $d_{m,t}^*$ , составил величину 100 мкм. Этот размер отделяет взрывоопасную фракцию образца пыли «частицы с размером не более  $d_{m,t}^*$ » от частиц с размером более  $d_{m,t}^*$ , неспособных к распространению пламени по АВП. Оценка [6] уточняет результаты работы [7], в которой предлагалось характеризовать частицы аэрозвеси полиэтилена двумя критическими размерами: с превышением размера 100 мкм происходит резкое снижение взрывоопасности аэрозвеси; с превышением размера 200 мкм аэрозвесь становится негорючей.

Разумно предположить, что анализ сведений о дисперсном составе образцов полиэтилена и показателей  $P_{\text{max}}$  и  $K_{st}$  для этих образцов может привести к установлению количественной связи между размером частиц и динамикой турбулентного горения полиэтилена. Следуя методике [8], в данной работе для характеристики дисперсности образца полиэтилена будет использован среднемассовый размер частиц только его взрывоопасной фракции  $d_{50}^*$  в отличие от работ других исследователей (см., например, [9–12]), где используют среднемассовый размер всех частиц  $d_{50}$ .

Таким образом, в настоящей работе оценивается влияние дисперсности частиц, выраженной параметром  $d_{50}^*$ , на динамику горения полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере.

## Исходные данные

Для решения поставленной задачи в настоящей работе использовали известные результаты (табл. 1) стандартного исследования взрывоопасности турбу-

<sup>1</sup> NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, Current Edition: 2018.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 12.3.047–2012. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

лентной АВП различного дисперсного состава в камере объемом 1 м<sup>3</sup> [13]. Здесь 1 бар = 10<sup>5</sup> кПа.

Моделирование используемых в дальнейшем непрерывных функций распределения частиц образцов по размерам  $F(d)$  производили следующим образом. На отрезке оси  $d$  между соседними аргументами, для которых величина  $F$  известна по результатам ситового анализа,  $F(d)$  представляется распределением Розина – Раммлера [14]:

$$F(d) = 1 - [1 - F(d_1)]^B, \quad (1)$$

где  $B = (d/d_1)^{G_k}$ ;

$G_k$  — крутизна функции распределения;

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

индекс  $k$  принимает значение от 1 до 4, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси  $d$  в следующем перечне отрезков: от 20 до 45 мкм, от 45 до 75 мкм, от 75 до 125 мкм, от 125 до 500 мкм;

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

На каждый из двух оставшихся участков оси  $d$  (область больших и область малых размеров частиц)

Таблица 1. Исходные сведения о взрывоопасности АВП в 1-м<sup>3</sup> камере [13]

Table 1. Input data on PAS explosive hazard in a 1 m<sup>3</sup> chamber [13]

| Номер образца<br>Specimen number | Значение $F$ (% масс.) по данным ситового анализа<br>$F$ value (% mass) according to sieve analysis |                 |                 |                   |                   | $d_{50}$ , мкм<br>$d_{50}$ , μm | $P_{\max}$ , бар<br>$P_{\max}$ , bar | $(dP/dt)_{\max}$ , бар/с<br>$(dP/dt)_{\max}$ , bar/s |
|----------------------------------|---|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--|
|                                  | 20 мкм<br>20 μm   | 32 мкм<br>32 μm | 71 мкм<br>71 μm | 125 мкм<br>125 μm | 500 мкм<br>500 μm |                                 |                                      |  |
| 1                                | 86  | 95              | –               | –                 | –                 | 6,5                             | 8                                    | 156  |
| 2                                | 0,8   | 0,94            | –               | –                 | –                 | 10                              | 7,6                                  | 82   |
| 3                                | 0,37  | 0,7             | –               | –                 | –                 | 24                              | 7,6                                  | 74   |
| 4                                | 21  | 94              | –               | –                 | –                 | 24                              | 7,6                                  | 54   |
| 5                                | 0,39  | 0,65            | –               | –                 | –                 | 25                              | 7,4                                  | 62   |
| 6                                | –   | –               | 73              | 97                | –                 | 52                              | 8,8                                  | 122  |
| 7                                | –   | 0,06            | 0,7             | –                 | –                 | 61                              | 8,5                                  | 131  |
| 8                                | –   | 0,16            | 0,56            | –                 | –                 | 65                              | 7,4                                  | 62   |
| 9                                | 14  | 22              | 47              | 79                | –                 | 76                              | 8,2                                  | 110  |
| 10                               | 14  | 21              | 42              | 62                | –                 | 90                              | 8,4                                  | 157  |
| 11                               | –   | –               | 0,28            | 0,7               | –                 | 98                              | 8,7                                  | 109  |
| 12                               | –   | –               | 30,7            | 56                | –                 | 111                             | 8,5                                  | 80   |
| 13                               | –   | –               | 0,21            | 0,5               | –                 | 125                             | 7,8                                  | 65   |
| 14                               | –   | –               | 21              | 44                | –                 | 135                             | 7,8                                  | 58   |
| 15                               | –   | –               | 0,1             | 0,36              | –                 | 149                             | 7,4                                  | 54   |
| 16                               | –   | –               | 7               | 28                | –                 | 160                             | 6,8                                  | 36   |
| 17                               | –   | –               | 6               | 27                | –                 | 162                             | 7,4                                  | 58   |
| 18                               | –   | –               | 7               | 24                | –                 | 163                             | 5,5                                  | 13   |
| 19                               | –   | –               | 0,06            | 0,25              | –                 | 173                             | 7,3                                  | 49   |
| 20                               | –   | –               | 0,02            | 0,18              | –                 | 173                             | 7,1                                  | 38   |
| 21                               | –   | –               | 0,09            | 0,25              | –                 | 195                             | 6,9                                  | 48   |
| 22                               | –   | –               | 0,09            | 0,2               | 0,9               | 245                             | 7,5                                  | 46   |
| 23                               | –   | –               | 0,11            | 0,19              | 0,9               | 249                             | 7,4                                  | 56   |
| 24                               | –   | –               | 0,04            | 0,13              | 0,91              | 270                             | 6,9                                  | 39   |
| 25                               | –   | –               | –               | 0,14              | 0,90              | 295                             | 5,9                                  | 18   |
| 26                               | –   | –               | 0,01            | 0,04              | 0,96              | 300                             | 7,2                                  | 76   |

распространяется функция распределения, построенная на смежном с ним отрезке. Расчетные значения параметра  $G_k$  приводятся в табл. 2.

Значения  $d_{50}^*$  удовлетворяют соотношению

$$F(d_{50}^*) = 0,5 F(d_{m,t}^*),$$

где  $F$  — функция распределения размеров частиц рассматриваемого образца;

$d_{m,t}^* = 100$  мкм. С примером геометрического построения оценки  $d_{50}^*$  можно ознакомиться в [8].

Таблица 2. Результаты обработки данных табл. 1

Table 2. Table 1 data processing results

| Номер образца<br>Specimen number | Значение $G_k$ на $k$ -диапазоне $d$ , мкм<br>$G_k$ value in the $k$ -range $d$ , $\mu\text{m}$ |                  |                   |                    | $d_{50}^*$ , мкм<br>$d_{50}^*$ , $\mu\text{m}$ | $U_b$ , м/с<br>$U_b$ , m/s |
|----------------------------------|---|------------------|-------------------|--------------------|--|----------------------------|
|                                  | $20 < d \leq 32$  | $32 < d \leq 71$ | $71 < d \leq 125$ | $125 < d \leq 500$ |  |                            |
| 1                                | 0,9   | –                | –                 | –                  | 6,5  | 1,6                        |
| 2                                | 1,19  | –                | –                 | –                  | 10   | 0,93                       |
| 3                                | 2,04  | –                | –                 | –                  | 24   | 0,84                       |
| 4                                | 5,28  | –                | –                 | –                  | 23,5   | 0,61                       |
| 5                                | 1,52  | –                | –                 | –                  | 25   | 0,74                       |
| 6                                | –   | –                | 1,74              | –                  | 45   | 1,04                       |
| 7                                | –   | 3,75             | –                 | –                  | 61   | 1,19                       |
| 8                                | –   | 1,95             | –                 | –                  | 54   | 0,74                       |
| 9                                | 1,06  | 1,18             | 1,59              | –                  | 47   | 1,07                       |
| 10                               | 0,95  | 1,05             | 1,02              | –                  | 43   | 1,46                       |
| 11                               | –   | –                | 2,32              | –                  | 67   | 0,95                       |
| 12                               | –   | –                | 1,42              | –                  | 56   | 0,73                       |
| 13                               | –   | –                | 1,91              | –                  | 66   | 0,7                        |
| 14                               | –   | –                | 1,59              | –                  | 63   | 0,62                       |
| 15                               | –   | –                | 2,55              | –                  | 73   | 0,64                       |
| 16                               | –   | –                | 2,67              | –                  | 76   | 0,51                       |
| 17                               | –   | –                | 2,91              | –                  | 76   | 0,69                       |
| 18                               | –   | –                | 2,35              | –                  | 71   | 0,28                       |
| 19                               | –   | –                | 2,72              | –                  | 78   | 0,6                        |
| 20                               | –   | –                | 3,84              | –                  | 87   | 0,49                       |
| 21                               | –   | –                | 1,97              | –                  | 71   | 0,65                       |
| 22                               | –   | –                | 1,52              | 1,68               | 62   | 0,53                       |
| 23                               | –   | –                | 1,05              | 1,73               | 50   | 0,67                       |
| 24                               | –   | –                | 2,17              | 2,06               | 71   | 0,53                       |
| 25                               | –   | –                | –                 | 1,97               | 73   | 0,34                       |
| 26                               | –   | –                | 2,48              | 3,15               | 71   | 0,95                       |

### Динамика горения пыли в 1-м<sup>3</sup> камере

Следуя методике, изложенной в [8], динамику турбулентного горения исследованного образца пыли в 1-м<sup>3</sup> камере будем отождествлять с максимальным значением скорости выгорания, которую обозначим символами  $U_b$ . Физически  $U_b$  представляет скорость расширения радиуса сферы с объемом, равным текущему объему продуктов горения взрывеси, относительно свежей смеси и определяется выражением [15].

$$U_b = \frac{K_{st}}{4,84 P_{\max} (1 + P/P_0)^{1/\gamma}} \left[ 1 - \frac{1 - P/P_{\max}}{(1 + P/P_0)^{1/\gamma}} \right]^{2/3}. \quad (2)$$

Здесь используется осциллограмма зависимости давления продуктов горения от времени  $P(t)$ , отвечающая максимальному значению производной  $(dP/dt)_{\max}$ ;  $P$  — значение избыточного давления продуктов горения, кПа, к моменту достижения производной  $dP/dt$  значения  $(dP/dt)_{\max}$ ;  $P_0 = 100$  кПа — начальное абсолютное давление воздуха во взрывной камере;  $\gamma$  — постоянная адиабаты для воздуха,  $\gamma = 1,4$ ;  $P/P_{\max}$  принадлежит интервалу значений  $0,6 \pm 0,1$ .

Отметим, что  $U_b$  характеризует динамику горения АВП к моменту времени, отвечающему повышенным параметрам состояния свежей взрывеси, подвергнутой сжатию продуктами горения (избыточному давлению  $\approx (500 \pm 100)$  кПа и температуре  $\approx 180$  °С).

Представленные в табл. 1 результаты позволяют в соответствии с (2) получить значения  $U_b$ , которые приводятся в табл. 2.

### Результат работы и его обсуждение

Для последующего изложения результата работы целесообразно учесть сходство горения пылей и топливных туманов, отмеченное в [16]. В дополнение к этому важно отметить, что полиэтилен имеет низкую температуру плавления ( $\approx 120$  °С) и частицы его горячей взрывеси уже на стадии предпламенного прогрева представляют жидкий аэрозоль, горение отдельных капель которого подчиняется классическому закону  $d$ -квадрата с постоянной  $1,3 \pm 0,1$  мм<sup>2</sup>/с [17]. В то же время известно, что скорость ламинарного пламени в жидких аэрозолях обратно пропорциональна диаметру капель, начиная с их некоторого размера [18, 19]. В связи с этим разумно предположить, что зависимость динамики турбулентного горения от дисперсности полиэтилена может оказаться схожей с описанной выше для случая ламинарного горения жидких аэрозолей. То есть целесообразно проверить существование диапазона размеров частиц, для которого произведение  $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$  имеет постоянное значение.

На рисунке приводится график зависимости комплекса  $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$  от  $d_{50}^*$  и его аппроксимация отрезками прямой. Несмотря на заметный разброс экспериментальных данных разумно предположить справедливость соотношения

$$d_{50}^* U_b(d_{50}^*) \approx 45 \text{ мкм} \cdot (\text{м/с}) \quad (3)$$

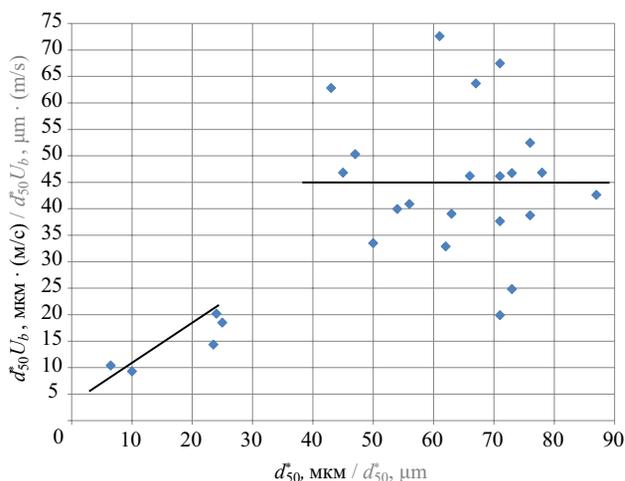
для диапазона размеров частиц от 40 до 90 мкм.

Для диапазона размеров частиц от 10 до 25 мкм аппроксимация предполагает пропорциональность  $d_{50}^* U_b(d_{50}^*) \propto d_{50}^*$ , из которой следует независимость скорости турбулентного выгорания АВП от среднего размера частиц:  $U_b \approx 0,8 \text{ м/с}$ . Из-за малочисленности экспериментальных данных не представляется возможным упомянутую независимость считать надежно установленной. В то же время предположение о существенном различии механизмов турбулентного горения АВП для рассмотренных двух диапазонов размеров частиц является вполне правомерным. В частности, разумно предполагать слабую зависимость  $U_b$  от  $d_{50}^*$  в диапазоне  $10 \text{ мкм} < d_{50}^* < 25 \text{ мкм}$ .

Для диапазона размеров частиц менее 10 мкм, представленного единственным экспериментом, разумно ожидать резкого увеличения скорости пламени, отвечающего турбулентному горению однородной смеси продуктов газификации полиэтилена с воздухом. В реальности, однако, этому может препятствовать склонность частиц полиэтилена к агломерации [9] или неоднородность газоздушной смеси, по аналогии с той, которая наблюдается в жидких аэрозолях с размером капель от 1 до 4 мкм [20].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries 3rd ed. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
2. *Butlin R.N.* Polyethylene dust-air flames // *Combustion and Flame*. 1971. Vol. 17. Issue 3. Pp. 446–448. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80071-8
3. *Pang L., Cao J., Ma R., Zhao Y., Yang K.* Risk assessment method of polyethylene dust explosion based on explosion parameters // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 69. P. 104397. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104397
4. *Wang Y., Lin C., Qi Y., Pei B., Wang L., Ji W.* Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate // *Powder Technology*. 2020. Vol. 367. Pp. 206–212. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.049
5. *Kazmi M.Z.* Experimental study of polyethylene and sulfur dust explosion characteristics // Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. 2018. 153 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/187126901.pdf>
6. *Полемаев Н.Л.* Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэрозвеси // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26
7. *Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S.* Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses // *Symposium (International) on Combustion*. 1982. Vol. 19. Issue 1. Pp. 1169–1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. *Полемаев Н.Л.* Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м<sup>3</sup> камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 5. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.5-12
9. *Gan B., Gao W., Jiang H., Li Y., Zhang Q., Bi M.* Flame propagation behaviors and temperature characteristics



Зависимость комплекса  $d_{50}^* U_b$  от среднего размера взрывоопасных частиц  $d_{50}^*$  аэрозвеси полиэтилена. Отрезки прямых — аппроксимация результата обработки дискретных экспериментальных данных [13]

Dependence of the complex  $d_{50}^* U_b$  on the average size of explosive particles  $d_{50}^*$  of the polyethylene air suspension. Line segments represent the approximation of the processed result of discrete experimental data [13]

## Выводы

Исследовано влияние дисперсности частиц на динамику турбулентного горения полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере. Показано, что максимальная скорость турбулентного выгорания аэрозвеси полиэтилена  $U_b$  в 1-м<sup>3</sup> камере обратно пропорциональна среднему размеру  $d_{50}^*$  той фракции материала, которая содержит взрывоопасные частицы:  $d_{50}^* U_b \approx 45 \text{ мкм} \cdot (\text{м/с})$  для значений  $d_{50}^*$  от 40 до 90 мкм.

В диапазоне значений  $d_{50}^*$  от 10 мкм до 25 мкм отмечена слабая зависимость  $U_b$  от  $d_{50}^*$ .

- in polyethylene dust explosions // *Powder Technology*. 2018. Vol. 328. Pp. 345–357. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.061
10. Pang L., Zhao Y., Yang K., Zhai H., Lv P., Sun S. Law of variation for low density polyethylene dust explosion with different inert gases // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 58. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.009
  11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
  12. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility // *Powder Technology*. 2018. Vol. 338. Pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044
  13. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben // SFTReport. No. 2. Pp. 2-79. 100 S.
  14. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
  15. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters // *Combustion and Flame*. 1992. Vol. 89. Pp. 320–332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
  16. Ballal D.R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1983. Vol. 385. Issue 1788. Pp. 21–51. DOI: 10.1098/rspa.1983.0003
  17. Sun P., Wu C., Zhu F., Wang S., Huang X. Microgravity combustion of polyethylene droplet in drop tower // *Combustion and Flame*. 2020. Vol. 222. Pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.032
  18. Myers G.D., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air // *Combustion and Flame*. 1986. Vol. 66. Issue 2. Pp. 193–210. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90091-x
  19. Ballal D.R., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air // *Symposium (International) on Combustion*. 1981. Vol. 18. Issue 1. Pp. 321–328. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80037-9
  20. Fan L., Tian B., Chong C.T., Jaafar M.N.M., Tanno K., McGrath D. et al. The effect of fine droplets on laminar propagation speed of a strained acetone-methane flame: experiment and simulations // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 229. P. 111377. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.023

## REFERENCES

1. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. Butlin R.N. Polyethylene dust-air flames. *Combustion and Flame*. 1971; 17(3):446-448. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80071-8
3. Pang L., Cao J., Ma R., Zhao Y., Yang K. Risk assessment method of polyethylene dust explosion based on explosion parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 69:104397. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104397
4. Wang Y., Lin C., Qi Y., Pei B., Wang L., Ji W. Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate. *Powder Technology*. 2020; 367:206-212. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.049
5. Kazmi M.Z. Experimental study of polyethylene and sulfur dust explosion characteristics. *Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science*. 2018; 153. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/187126901.pdf>
6. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive mono-disperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26 (rus).
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses. *Symposium (International) on Combustion*. 1982; 19(1):1169-1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m<sup>3</sup> chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5): 5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.5-12 (rus).
9. Gan B., Gao W., Jiang H., Li Y., Zhang Q., Bi M. Flame propagation behaviors and temperature characteristics in polyethylene dust explosions. *Powder Technology*. 2018; 328:345-357. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.061
10. Pang L., Zhao Y., Yang K., Zhai H., Lv P., Sun S. Law of variation for low density polyethylene dust explosion with different inert gases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 58:42-50. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.009
11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
12. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility. *Powder Technology*. 2018; 338:438-445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044

13. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben. *SFT-Report*. 2; 279:100. (ger).
14. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264. (rus).
15. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters. *Combustion and Flame*. 1992; 89:320-332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
16. Ballal D.R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1983; 385(1788):21-51. DOI: 10.1098/rspa.1983.0003
17. Sun P., Wu C., Zhu F., Wang S., Huang X. Micro-gravity combustion of polyethylene droplet in drop tower. *Combustion and Flame*. 2020; 222:18-26. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.032
18. Myers G.D., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air. *Combustion and Flame*. 1986; 66(2):193-210. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90091-x
19. Ballal D.R., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air. *Symposium (International) on Combustion*. 1981; 18(1):321-328. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80037-9
20. Fan L., Tian B., Chong C.T., Jaafar M.N.M., Tanno K., McGrath D. et al. The effect of fine droplets on laminar propagation speed of a strained acetone-methane flame: experiment and simulations. *Combustion and Flame*. 2021; 229:111377. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.023

Поступила 28.10.2022, после доработки 15.11.2022;  
принята к публикации 25.11.2022

Received October 28, 2022; Received in revised form November 15, 2022;  
Accepted November 25, 2022

### Информация об авторе

**ПОЛЕТАЕВ Николай Львович**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

### Information about the author

**Nikolay L. POLETAEV**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC:1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

# Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия

Анатолий Никитович Гаращенко<sup>1</sup>✉, Сергей Порфирьевич Антонов<sup>1, 2</sup>, Александр Всеволодович Виноградов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «ПРОЗАСК», г. Москва, Россия

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

<sup>3</sup> АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Московская обл., Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** На примере огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» продемонстрирована целесообразность и вариант проведения комплексных исследований характеристик и эффективности огнезащиты на минеральных вяжущих.

**Цели и задачи.** Получение результатов экспериментальных исследований теплотехнических характеристик огнезащитных плит на цементном вяжущем и их огнезащитной эффективности на стенде лучистого нагрева при воспроизведении заданных режимов высокотемпературного воздействия, анализ полученных результатов с использованием методики математического моделирования температурных полей в конструкциях с огнезащитой.

**Методы.** Использовались стандартизованные лабораторные методики для уточнения теплофизических характеристик плит при относительно низких температурах. Оценивалась огнезащитная эффективность плит в ходе дополнительных испытаний образцов на стенде лучистого нагрева. Для теплотехнического анализа и обобщения экспериментальных результатов использовалась надежная и относительно несложная методика и программа расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой. Обобщались результаты стандартизованных испытаний в огневой печи по определению огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и огнестойкости защищаемых ими натуральных конструкций.

**Результаты.** Уточнены значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности плит на лабораторных установках при относительно низких температурах. Получены результаты термометрических измерений при испытаниях образцов огнезащиты на стенде лучистого нагрева при воспроизведении стандартного и углеводородного температурных режимов воздействия. Обработка этих результатов с использованием теплотехнических расчетов позволила определить значения коэффициента теплопроводности в рабочем диапазоне температур. Проведена оценка влияния содержащейся в плитах влаги на их огнезащитную эффективность. Сопоставление результатов расчетов и испытаний конструкций в огневых печах продемонстрировало возможность практического использования полученных характеристик плит и методики теплотехнических расчетов для уточнения эффективности и проектирования огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и оценки огнестойкости защищаемых ими конструкций.

**Выводы.** Представленные результаты комплексных исследований позволили получить значительный объем важной информации, необходимой для проектирования огнезащиты и обеспечения заданной огнестойкости конструкций, облицованных плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». Продемонстрирована роль дополнительных испытаний образцов на стенде лучистого нагрева и эффективности теплотехнических расчетов, как инструмента для оценки параметров огнезащиты и огнестойкости конструкций.

**Ключевые слова:** огнезащитная эффективность; огнестойкость; лучистый нагрев; теплотехнический расчет; стандартный температурный режим воздействия; углеводородный температурный режим воздействия

**Для цитирования:** Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 13–29. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29.

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

# Studying the thermal characteristics and effectiveness of structural fire proofing made of PROZASK Firepanel cement boards by means of reproducing the high-temperature effect

Anatoliy N. Garashchenko<sup>1</sup>✉, Sergey P. Antonov<sup>1,2</sup>, Aleksandr V. Vinogradov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PROZASK, LLC, Moscow, Russian Federation

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

<sup>3</sup> Central Research Institute for Special Machinery, JSC, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The application of PROZASK fire-retardant panels demonstrates an option for and the expediency of a comprehensive study of fire proofing characteristics.

**Goals and objectives.** The mission of this research project is to (1) obtain the results of experimental studies of fireproofing panels, containing the cement binder, (2) determine their fire proofing efficiency, using the radiant heating test bench that reproduces pre-set modes of high-temperature exposure, and (2) analyze the testing results using the method of mathematical modelling of temperature fields inside fireproof structures.

**Methods.** Standardized laboratory techniques were used to clarify the thermal-physical characteristics of boards at relatively low temperatures. Their fire proofing efficiency was evaluated in the course of additional testing of specimens using the radiant heating test bench. A reliable and relatively uncomplicated method and programme for calculating unsteady temperature fields in fireproof structures were used to conduct the thermal analysis and generalization of experimental results. The authors summarized the results of standardized tests, conducted in a fire furnace, to determine the flame-retardant efficiency of PROZASK Firepanel boards and the fire-resistance of the full-size structures they protect.

**Results.** Values of specific heat capacity and the thermal conductivity coefficient of boards, tested using laboratory benches at relatively low temperatures, were verified. The results of thermocouple measurements, taken during the testing of specimens with the help of the radiant heating bench in standard and hydrocarbon temperature modes, were obtained. The processing of these results, using thermal engineering analysis, allowed determining the values of the thermal conductivity coefficient in the range of operating temperatures. The influence of moisture, contained in the boards, on their fire protection efficiency was evaluated. Comparison between the results of calculations and tests, conducted in the fire furnaces, showed the practical usability of the obtained characteristics of boards and the thermo-engineering analysis used to (1) clarify the fire-proofing efficiency and the design developed using PROZASK Firepanels and (2) evaluate the fire-resistance of the constructions they protect.

**Conclusions.** The presented integrated studies generated a considerable amount of important information, required to prognosticate the fire proofing properties and the fire-resistance of constructions that contain PROZASK Firepanels. The role of additional testing of specimens using a radiant heating test bench and the effectiveness of thermal-engineering calculations as a tool for assessing the parameters of fire proofing and the fire resistance of structures are demonstrated.

**Keywords:** flame-retardant efficiency; fire resistance; radiant heating; thermal engineering analysis; standard temperature mode of exposure; hydrocarbon temperature mode of exposure

**For citation:** Garashchenko A.N., Antonov S.P., Vinogradov A.V. Studying the thermal characteristics and effectiveness of structural fire proofing made of PROZASK Firepanel cement boards by means of reproducing the high-temperature effect. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):13-29. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29 (rus).

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

## Введение

Обеспечение высоких пределов огнестойкости, задаваемых для наиболее ответственных строительных конструкций, возможно при использовании конструктивной огнезащиты на основе плит, матов или огнезащитных штукатурок (напыляемых материалов) значительной толщины. К их числу относятся огнезащитные плиты и штукатурки, изготавливаемые на основе минеральных вяжущих (цемент, гипс, силикат кальция и др.) и различных наполнителей (например, вермикулит). Информа-

ция по исследованиям, проектированию и отработке такой огнезащиты содержится в многочисленных отечественных [1–12] и зарубежных [13–25] публикациях.

Исследования эффективности, оценка и обоснование требуемых толщин применяемых материалов должны проводиться с учетом особенностей исполнения огнезащиты и предполагают решение целого комплекса задач, включающих определение основных характеристик материалов, проектные расчеты, подтверждение работоспособности путем стандартизированных огневых экспериментов. Для

проектирования требуется информация по испытаниям типовых несущих конструкций с огнезащитой в огневых печах при эксплуатационных статических нагрузках. Они предусмотрены нормативными документами, и их проведение является завершающим и наиболее затратным этапом обеспечения огнезащиты и огнестойкости конструкций. Известно, что возможности огневых экспериментов ограничены размерами типовых конструкций и рядом других обстоятельств, что требует уделять все большее внимание теплотехническим расчетным методам, обеспечивающим качественный анализ и обобщения результатов испытаний, а также определение проектных толщин огнезащиты.

Целесообразность и эффективность использования теплотехнических расчетов по надежным методикам для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов продемонстрирована в [11, 12] на примере конструкций из чугуна и железобетона. Для расчетов необходимы теплофизические характеристики (ТФХ) применяемых огнезащитных материалов. Имеются публикации, в которых рассматриваются методики и результаты определения ТФХ с использованием, в большинстве случаев, лабораторного оборудования для исследований при «комнатных» температурах.

В отдельных случаях для оценки эффективности и определения значений ТФХ при высоких температурах проводились дополнительные испытания при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия на образцы [10, 18, 20, 26, 27]. В целом можно констатировать, что информация по ТФХ у большинства производителей огнезащитных материалов ограничена результатами, полученными при «комнатных» температурах, и возможность практического использования таких данных не всегда обоснована, в особенности для материалов, претерпевающих сложные превращения при высокотемпературном нагреве. К их числу относятся плиты и штукатурки на основе минеральных вяжущих (цемент, гипс, бетон).

Известно, что номенклатура огнезащитных плит на таких вяжущих по сравнению со штукатурками на отечественном рынке относительно невелика. Их ограниченная номенклатура связана с достаточно сложной технологией и дорогостоящим оборудованием для их изготовления. Все они широко используются в качестве огнезащиты различных конструкций и коммуникаций, причем как непосредственно, так и в виде облицовок в комбинации, например, с волокнистыми материалами. Исследованиям, проектированию и особенностям применения такой востребованной конструктивной огнезащиты необходимо уделять должное внимание.

Важность конструктивной огнезащиты плитами подтверждается использованием на практике отраслевого нормативного документа — стандарта СТО АРСС 11251254.001-018-03, подготовленного Ассоциацией развития стального строительства (АРСС) [28]. Он содержит статическую и теплотехническую части в методике оценки огнестойкости конструкций из стали и предназначен для применения при проектировании огнезащиты из плит (облицовок). Следует также отметить, что, по нашему мнению, недостатком стандарта АРСС 11251254.001-018-03, а также ряда публикаций [3, 4], подготовленных на его основе, является то, что в них предполагается использование хоть и приемлемой, но устаревшей методики теплотехнических расчетов для определения проектных толщин огнезащиты. В [3, 4, 28] приводятся данные по рекомендуемым проектным толщинам огнезащиты, но не приводятся данные о теплофизических характеристиках материалов, необходимых для проведения расчетов как по имеющимся, так и по вновь создаваемым (более совершенным) методикам.

Анализ зарубежного опыта свидетельствует, что расчеты проектных толщин огнезащитных плит, предусматривающие составление таблиц и построение номограмм, регламентируются нормативными документами, в частности европейским стандартом EN 13381-4:2013<sup>1</sup>. Применяемый подход предусматривает обработку результатов измерений температуры в ходе огневых испытаний значительного количества стальных конструкций, защищенных плитами, в ходе серии из десятка испытаний при, как правило, стандартном режиме воздействия. При их обработке определяются и впоследствии используются при определении толщин огнезащиты, так называемые, эффективные (или модифицированные) коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости.

Используется одномерная математическая модель, с помощью которой устанавливаются зависимости между минимальной толщиной огнезащиты, теплофизическими характеристиками материалов, температурой стали, а также приведенной толщиной металла и промежутком времени, в течение которого сохраняется огнестойкость конструкций. Показательно, что при таком подходе, предусмотренном в EN 13381-4:2013, получается своеобразный характер изменения от температуры эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной удельной теплоемкости. Здесь эти важнейшие параметры принимаются в качестве параметров согласования

<sup>1</sup> EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4: Applied passive protection to steel members. European Committee For Standardization. Management Centre: Brussels. 2013 CEN. 83 p.

«эксперимент–расчет». При этом указанный стандарт распространяется на все виды конструктивной (пассивной) огнезащиты (в том числе из влагосодержащих материалов, при нагреве которых происходит целый комплекс сложных процессов). Подход, регламентируемый упомянутым европейский стандартом, имеет, безусловно, право на жизнь, однако целесообразность его адаптации к нашим реалиям дискуссионна. Это обусловлено значительными затратами на подготовку и проведение большой серии огневых испытаний, а также необходимостью адаптации у нас предусмотренного стандартом программного обеспечения для обработки их результатов и проведения расчетов толщин огнезащиты.

Нами предлагается проводить теплотехнические расчеты по относительно несложным отечественными методикам и программным комплексам, и это позволяет, как показано, например, в [11, 12], существенно повысить качество анализа и обобщения результатов дорогостоящих огневых испытаний. Отмеченные выше обстоятельства свидетельствуют об актуальности проведения комплексных исследований эффективности и характеристик конкретных материалов конструктивной огнезащиты с использованием хорошо зарекомендовавших себя доступных методов экспериментальных исследований теплотехнических характеристик огнезащиты, с уточнением ее ТФХ, а также использованием доступных и надежных методов теплотехнических расчетов.

Практика исследований показала, что решению задачи по выбору и обеспечению рациональной огнезащиты, прогнозированию заданной огнестойкости конструкций способствуют организация и проведение серии дополнительных испытаний образцов огнезащиты относительно небольших размеров на лабораторно-стендовом оборудовании. Это в данной статье демонстрируется на примере варианта конструктивной огнезащиты, применение которого представляется перспективным.

### Материалы и методы

Одним из таких вариантов огнезащиты являются плиты на цементном вяжущем «ПРОЗАСК Файерпанель», которые в настоящее время успешно используются и по которым проводились и продолжают проводиться исследования различных свойств с подтверждением их работоспособности и эффективности в ходе огневых экспериментов. Они изготавливаются на основе портландцемента с легким наполнителем.

Разработаны схемы крепления плит на типовые конструкции из стали и железобетона. Для оценки (подтверждения) работоспособности и эффективности конструктивной огнезащиты такими плитами,

а также огнестойкости защищаемых ими конструкций проводились многочисленные огневые испытания конструкций колонн, балок, перекрытий и стеновых панелей под нагрузкой. Они проводились со штатными элементами крепления плит, работоспособность которых также подтверждалась при таких испытаниях. Можно отметить, что удачная конструкция элементов крепления позволяет уменьшить (за счет эффекта демпфирования) нагрузки на плиты при деформациях нагруженных конструкций и тем самым способствует обеспечению их заданной огнестойкости.

Естественно, основное внимание должно уделяться оценке огнезащитной эффективности плит и оценкам фактической огнестойкости защищаемых ими конструкций. Кроме того, важное значение имеет исследование всего комплекса характеристик, необходимых для обоснованного выбора и использования наиболее приемлемого варианта и толщин огнезащиты.

Именно такой комплексный подход применяется для плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Он предусматривает определение теплофизических характеристик при относительно низких температурах по стандартизованным лабораторным методикам, а также показателей эксплуатационной стойкости при климатических воздействиях. Наряду с этим, а также в дополнение к огневым экспериментам на натуральных образцах конструкций с огнезащитой, проведены испытания образцов плит относительно небольших размеров при воспроизведении реальных условий высокотемпературного воздействия. Они являются источником дополнительной информации по теплотехнической эффективности плит, а обработка полученных данных позволяет уточнить их ТФХ в рабочем диапазоне температур, что не обеспечивается доступными стандартизованными лабораторными методиками.

Анализ публикаций по методам и результатам испытаний образцов на лабораторно-стендовом оборудовании при воспроизведении условий огневого воздействия, проведенный в [26], показал, что наиболее приемлемым для исследований теплотехнических характеристик различных средств огнезащиты является использование стенда лучистого нагрева с источником нагрева в виде пакета мощных галогенных ламп накаливания. В указанной статье, а также в [27] представлена информация о данном стенде и описана методика проведения испытаний, а также результаты, полученные для образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтосилового материала. При этом результаты исследований, представленные в [26, 27], продемонстрировали возможность исследований огнезащитной эффективности подобных материалов, при воспроизведении

как стандартного, так и углеводородного режимов пожара.

Было показано [26, 27], что проведение и обработка результатов термометрических измерений при испытаниях позволила оценить значения его высокотемпературных ТФХ, необходимых для проведения теплотехнических расчетов, и, в частности, наиболее важного показателя — эффективного коэффициента теплопроводности. Продемонстрированы [27] возможности таких расчетов для анализа эффективности конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтслюднистого материала. Экспериментальные исследования включали определение ТФХ данного материала стандартизованными лабораторными методами при относительно низких температурах, а также оценку его эффективности и теплотехнических свойств на стенде лучистого нагрева с дальнейшим уточнением ТФХ, но уже в рабочем диапазоне температур. Подобные исследования, включающие лабораторно-стендовые испытания и теплотехнические расчеты, были проведены и для варианта конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

Объектом испытаний на стенде лучистого нагрева являлись образцы, состоящие из 1, 2 и 3 слоев таких плит толщиной 12,5 мм каждого слоя. Плиты ориентировались лицевой поверхностью в сторону нагрева. Выбран размер образцов 300×200 мм, что существенно меньше, чем зона нагрева пакетом ламп. Защищаемым элементом являлась пластина из стали толщиной 3 мм такого же размера. Огнезащитные плиты скрепляются со стальной пластиной, а также между собой (для двух- и трехслойных образцов) с помощью саморезов.

Теплотехнические характеристики и огнезащитная эффективность оценивались по результатам измерения температур, что обеспечивалось установкой хромель-копелевых или хромель-алюмелевых термопар на нагреваемой поверхности образцов огнезащиты в центральной их части, между слоями плит, а также на границе стальная подложка — огнезащита и стальная подложка — теплоизоляция (по две термопары в каждой из указанных зон). Образец вместе с термопарами размещался в проеме плоской вертикальной панели из плиты толщиной 60 мм, обладающей высокой термостойкостью и относительно низкой теплопроводностью, что минимизирует теплопередачу по периметру образца. Предусмотрена теплоизоляция на его необогреваемой стороне базальтслюднистым матом толщиной 30 мм. Воспроизведение требуемого температурного режима нагрева (по аналогии с [26, 27]) производилось за счет изменения мощности нагревателя. Обеспечивалось соответствующее

изменение температуры нагреваемой поверхности образцов на уровне температуры газовой среды при стандартном или углеводородном режимах пожара.

Ранее полученные результаты исследований образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтслюднистого материала, представленные в [26, 27], продемонстрировали, что на характер изменения температуры в образцах влияет влага, содержащаяся в относительно тонких слоях клеевого состава, используемого для скрепления слоев огнезащиты между собой и защищаемым элементом. С учетом этого явления, характерного для всех влагосодержащих материалов, методика испытаний плит «ПРОЗАСК Файерпанель» была дополнена проведением повторных испытаний, проводимых после охлаждения стенда без демонтажа образца (т.е. проводились испытания того же образца после удаления из него влаги в ходе предыдущего эксперимента). Предполагалось, что сопоставление температурных кривых при этих двух испытаниях может дать информацию о том, каково влияние физически и химически связанной воды, находящейся в плите, на ее теплотехнические характеристики.

### Результаты исследований и их обсуждение

Проведена серия из трех испытаний образцов, состоящих из одного, двух и трех слоев плит «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении высокотемпературного воздействия по стандартному температурному режиму, а также серия из трех испытаний при воспроизведении углеводородного температурного режима. Их продолжительность задавалась с учетом режима воздействия и количества плит в образце.

Результаты испытаний представлены в табл. 1 и на рис. 1–3. На графиках имеются показания всех термопар, установленных как на поверхности образцов (для регулирования режима нагрева), так и термопар, установленных в самих образцах. В каждом эксперименте после окончания интенсивного воздействия запись продолжалась, и регистрировалось перераспределение температуры по толщине образца при его охлаждении. Фиксация показаний термопар производилась с помощью компьютера, вид экрана которого в ходе одного из испытаний показан на рис. 1.

Анализ результатов измерений температуры показал следующее. Вид кривых на рис. 2 характерен для прогрева влагосодержащих материалов и обусловлен комплексом сложных процессов теплопереноса в процессе нагрева цемента, входящего в состав исследуемых плит. Они включают испарение влаги, дегидратацию компонентов, диффузию образовавшегося пара, его конденсацию в «холодной» зоне, последующее кипение вторич-



**Рис. 1.** Экран компьютера с графиками для текущего контроля за динамикой изменения температуры образца в ходе одного из экспериментов

**Fig. 1.** Current monitoring of the dynamics of the sample temperature change during one of the experiments

ной влаги и диффузию пара [26, 29, 30]. При этом фиксируется так называемая «полка» или «плато», что показали также полученные ранее результаты

испытаний конструкций с рассматриваемым вариантом огнезащиты в огневых печах.

Для оценки влияния влаги на теплотехнические характеристики исследуемых плит проведено три повторных испытания образцов, состоящих из двух и трех слоев плит (см. табл. 1), после охлаждения стенда без демонтажа этих образцов (т.е. после удаления из них влаги). На рис. 3 представлены результаты термометрических измерений в ходе повторного испытания образцов из двух и трех слоев плит при воздействии на них по стандартному температурному режиму. Представлены кривые, полученные в результате осреднения показаний термопар, установленных в каждой зоне образцов, в том числе показаний четырех термопар по обеим сторонам стальной пластины.

Можно отметить, что были обеспечены практически одинаковые условия воздействия и это облегчает проведение объективного анализа влияния влаги на прогрев огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Такое влияние удобно рассматривать, сравнивая осредненные показания термопар в ходе основного и повторного испытания (рис. 3). Сопоставление кривых показало, что после удале-

**Таблица 1.** Информация об испытаниях образцов плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на стенде лучистого нагрева

**Table 1.** Information about the tests of PROSASK Firepanel board specimens at the radiant heating bench

| Режим воздействия<br>Exposure mode | Количество плит в образце<br>Number of plates in a specimen | Время интенсивного воздействия, мин<br>Time of intensive exposure, min | Максимальная температура пластины в конце воздействия, °C<br>Maximum plate temperature at the end of exposure, °C | Время прогрева пластины до 500 °C, мин<br>Plate warming time (up to 500 °C), min |                    | Температурные кривые<br>Temperature curves |
|------------------------------------|---|--|---|--|--------------------|--|
|                                    |   |  |   | Эксперимент<br>Experiment  | Расчет<br>Analysis |  |
| Стандартный<br>Standard            | 1   | 41   | 582   | 29,2   | 29,4               | Рис. 2, а<br>Fig. 2, a                     |
|                                    | 2   | 65   | 510   | 63,1   | 61,5               | Рис. 2, b<br>Fig. 2, b                     |
|                                    |   | 66,2*  | 490*  | 67,4   | —                  | Рис. 3, a<br>Fig. 3, a                     |
|                                    | 3   | 90   | 455   | > 90   | > 90               | Рис. 2, c<br>Fig. 2, c                     |
|                                    |   | 90*  | 432*  | > 90*  | —                  | Рис. 3, b<br>Fig. 3, b                     |
| Углеводородный<br>Hydrocarbon      | 1   | 43,9   | 774   | 16,4   | 15,5               | Рис. 2, d<br>Fig. 2, d                     |
|                                    | 2   | 44   | 538   | 39,3   | 39,6               | Рис. 2, e<br>Fig. 2, e                     |
|                                    |   | 60*  | 602*  | 39,6   | —                  | Рис. 4<br>Fig. 4                           |
|                                    | 3   | 40   | 223   | >> 40  | >> 40              | Рис. 2, f<br>Fig. 2, f                     |

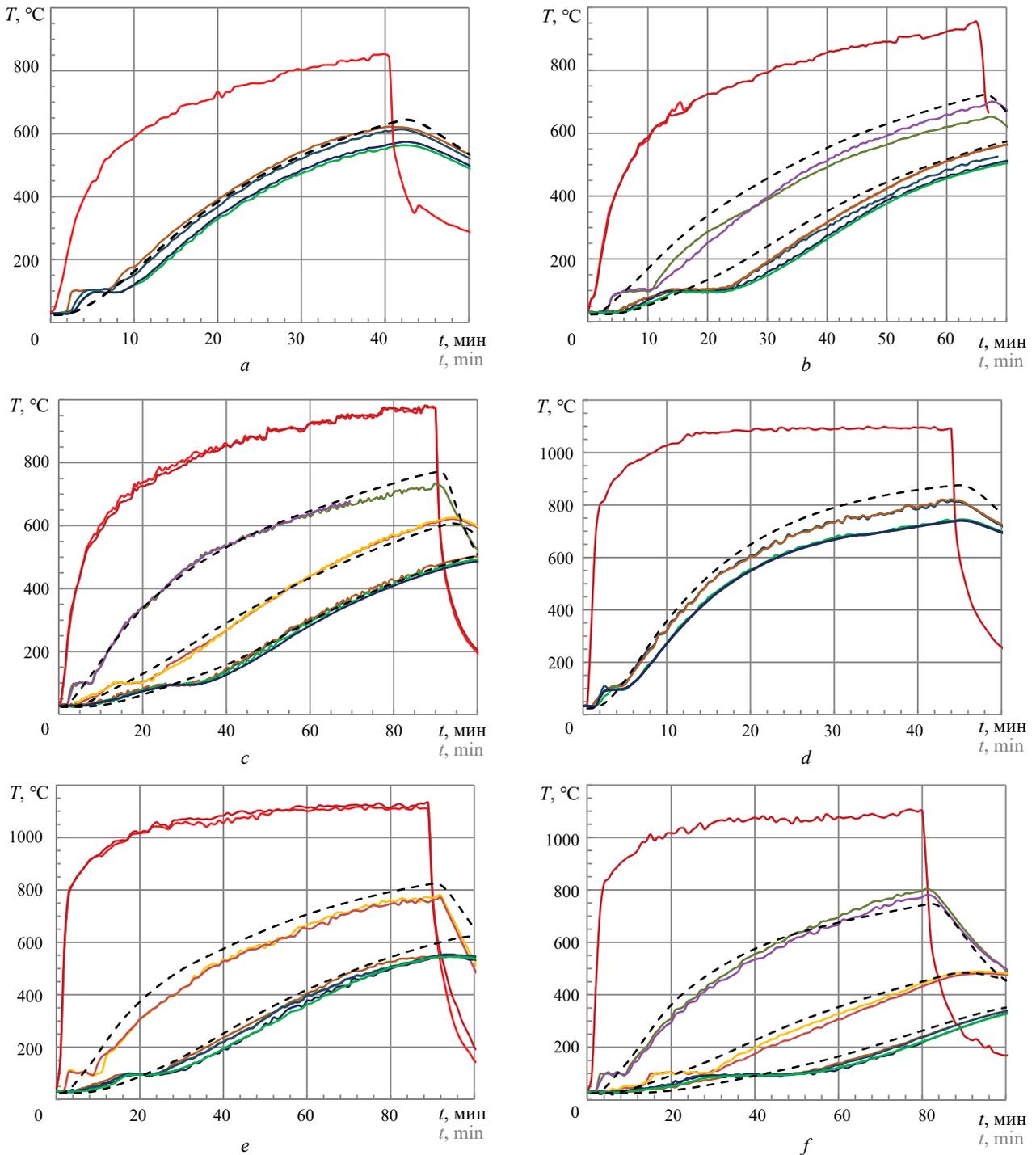
\* Повторное испытание после охлаждения стенда с образцом.

\* Repeated testing after the specimen is cooled down.

ния влаги из образца, естественно, отсутствует полка (плато) на уровне 100 °С. При этом в случае длительного воздействия температура стальной пластины остается на том же уровне, что и при

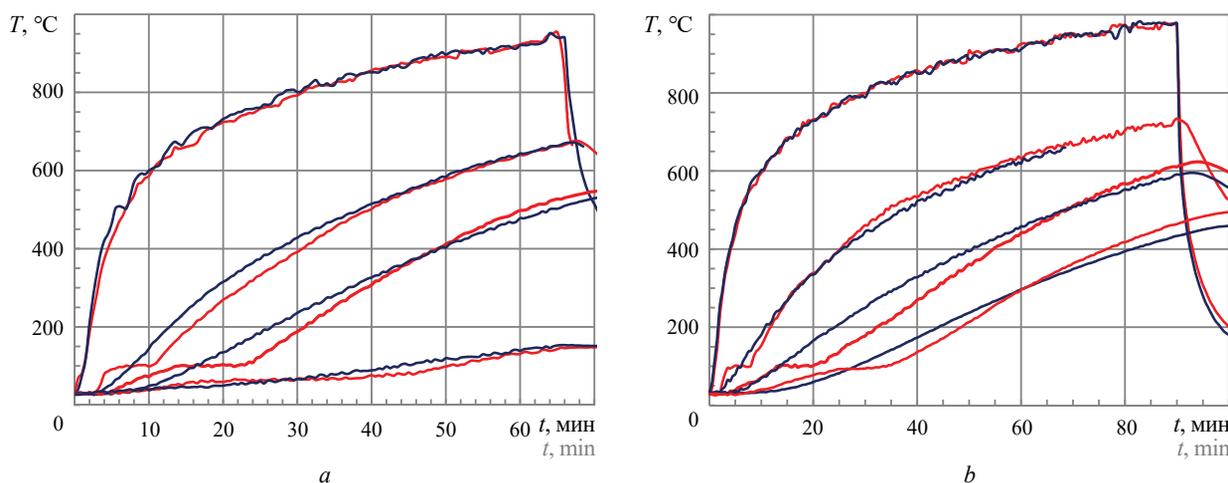
основных испытаниях, т.е. огнезащитные свойства образцов сохраняются.

Кроме прочего, результаты измерений демонстрируют, на сколько повышается температура



**Рис. 2.** Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты, состоящей из одного (a, d), двух (b, e) и трех (c, f) слоев плит (—, —), на границе между стальной пластиной и огнезащитой (—, —), пластиной и теплоизоляцией (—, —), а также между первым и вторым (—, —), вторым и третьим (—, —) слоями плит при воздействии по стандартному (a, b, c) и углеводородному (d, e, f) температурному режиму; - - - - - расчет

**Fig. 2.** Temperature changes on the heated surface of the fire proofing that has one (a, d), two (b, e) and three (c, f) layers of plates (—, —), at the interface between the steel plate and the fire proofing (—, —), the plate and the thermal insulation (—, —), as well as between the first and second (—, —), second and third layers of plates (—, —) exposed to standard (a, b, c) and hydrocarbon (g, d, e) temperature modes; - - - - - analysis



**Рис. 3.** Сопоставление осредненных результатов термопарных измерений в ходе испытаний образцов, состоящих из двух (а) и трех (б) плит при воздействии по стандартному режиму (—) (см. рис. 2, б, с), а также в ходе повторных испытаний этих же образцов после охлаждения (—)

Fig. 3. Comparison between the averaged results of thermocouple measurements during the testing of specimens consisting of two (a) and three (b) plates in the standard mode (—) (see Fig. 2, b, c), as well as during repeated tests after cooling (—)

защищаемой конструкции (стальной пластины) после окончания теплового воздействия. В максимальной степени это характерно для образцов большей толщины (см. рис. 2, с, f) ввиду большего количества тепла, аккумулированного им при нагреве. Это подтверждает необходимость оценки не только огнестойкости конструкций, но и влияния такого перераспределения тепла на огнесохранность конструкций.

Визуальный осмотр образцов после испытаний показал, что их целостность после первоначального воздействия сохраняется. Наблюдается только появление небольшой сетки трещин на поверхности. В ходе повторного эксперимента наружный слой образцов растрескался и частично разрушился, что показано на рис. 4.

На рис. 5 по аналогии с вариантом воздействия по стандартному режиму показано сопоставление осредненных результатов термопарных измерений,



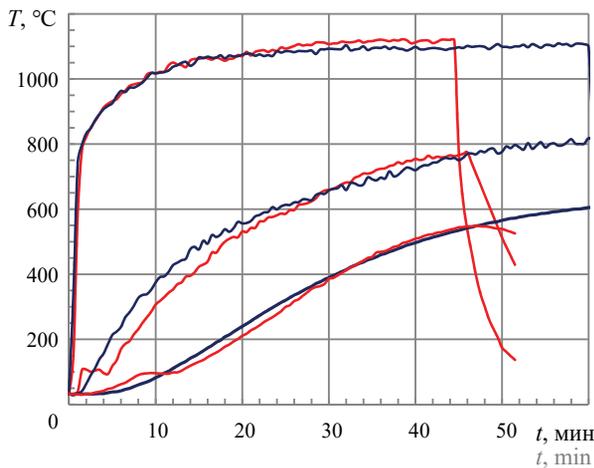
**Рис. 4.** Внешний вид образца после повторного испытания  
Fig. 4. The appearance of the specimen after repeated testing

полученных для образца, состоящего из двух слоев плит при воздействии по углеводородному режиму. Время повторного (после удаления влаги) испытания было больше, чем основного (44 мин), и составило 60 мин.

Вид кривых, как и на рис. 3, соответствующим образом изменился, однако уровень нагрева стальной пластины при наличии и отсутствии влаги в образце после длительного воздействия (не менее 44 мин) почти не изменился. И в данном случае огнезащитные свойства образца практически не изменились, даже несмотря на появление трещин в поверхностном слое плит.

Следует отметить, что удалось получить результаты при углеводородном, т.е. наиболее жестком режиме воздействия. Их, как и результаты, полученные при стандартном режиме, можно использовать при анализе теплотехнических характеристик и огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель». В частности, представленные температурные кривые могут использоваться для уточнения ТФХ плит в широком температурном диапазоне, а также для уточнения методики теплотехнических расчетов для данного варианта огнезащиты. Кроме важных экспериментальных результатов, полученных на стенде, в данной статье представлен вариант обработки результатов испытаний образцов с оценкой ТФХ плит в рабочем диапазоне температур.

Важной частью комплексных исследований являлся теплотехнический анализ, который проводился по аналогии с обработкой результатов испытаний образцов базальтосилового материала на стенде лучистого нагрева [27]. Ранее подобным образом проводилась обработка результатов огневых экспериментов образцов натуральных строитель-



**Рис. 5.** Сопоставление осредненных результатов термодинамических измерений в ходе испытаний образцов, состоящих из двух плит при воздействии по углеводородному режиму (—) (см. рис. 2, e), а также в ходе повторного испытания этого же образца после охлаждения (—)

**Fig. 5.** Comparison between the averaged results of thermocouple measurements made during the testing of specimens consisting of two plates in the hydrocarbon mode (—) (see Fig. 2, e), as well as during the repeated testing of the same specimen after cooling (—)

ных конструкций: чугунных тубингов обделки тоннелей метрополитена [11] и железобетонных несущих конструкций [12]. В ходе анализа применялась надежная и относительно несложная методика и компьютерная программа теплотехнических расчетов нестационарного процесса теплопередачи в многослойной конструкции «Огнезащита. Версия ВУ.2». Описание используемой математической модели и программы представлено в [11, 29]. Используемая программа разработана в результате численного решения системы уравнений, включающих элементарное (без усложнений) уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями, для описания высокотемпературного воздействия на огнезащиту. Подобными программами пользуются большинство исследователей в нашей стране и за рубежом (см. [9–12, 19, 25], EN 13381-4:2013 и др.).

Проведенные нами экспериментальные исследования включали уточнение ТФХ плит. Первым шагом являлось определение коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости при относительно низких температурах стандартизованными лабораторными методами. Были предусмотрены также повторные испытания образцов после удаления из них влаги. Уточнена исходная плотность исследуемых плит, она составила 1124 кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопроводности определялся при температурах порядка 25 °С на приборе ИТП-МГ4, используемом для испытаний строительных материалов, на образцах размером 100×100 мм при стационарном тепловом режиме (ГОСТ 7076–99). На первом образце получено зна-

чение 0,287 Вт/(м·К), на втором — 0,269 Вт/(м·К) (осредненное значение — 0,278 Вт/(м·К)). Для учета влияния влаги, содержащейся в плитах, определены значения коэффициента теплопроводности, полученные на этих же образцах после их сушки. После нагрева первого образца в муфельной печи со скоростью 25 °С/мин до температуры 500 °С и выдержки в течение 10 мин получено приблизительно 25-процентное уменьшение коэффициента теплопроводности (0,215 Вт/(м·К)). Потеря массы образца составила 8%. После выдержки второго образца в муфельной печи при температуре 80 °С в течение 30 мин отмечено снижение коэффициента теплопроводности до 0,257 Вт/(м·К).

Проведено также определение удельной теплоемкости на приборе ИТ-Ср-400 по ГОСТ 23630.1–79 в диапазоне температур от 25 до 300 °С (сравнительный метод динамического калориметра). Использовались образцы диаметром 15 мм и высотой 10 мм. Получена зависимость удельной теплоемкости от температуры, представленная в табл. 1. Обращает на себя внимание значительно больший уровень удельной теплоемкости при температурах выше 100 °С, что характерно для влагосодержащих материалов (см., например, EN 13381-4:2013, [19, 24, 25, 31]). В этой же таблице представлена зави-

**Таблица 2.** Результаты определения удельной теплоемкости плит на приборе ИТ-Ср-400

**Table 2.** Specific heat capacity identified using IT-Sr-400

| Температура, °С<br>Temperature, °С | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)<br>Specific heat capacity, J/(kg·K) |   |  |
|------------------------------------|--|---|--|
|                                    | Исходный материал<br>Source material                                 | Нагрев и выдержка 30 мин в муфельной печи при 300 °С<br>Heating and curing in a muffle furnace at 300 °С for 30 min | Выдержка в течение суток при комнатной температуре<br>One-day exposure at room temperature |
| 25                                 | 818  | 656   | 732  |
| 50                                 | 853  | 626   | 760  |
| 75                                 | 978  | 674   | 893  |
| 100                                | 1103   | 1024  | 1068   |
| 125                                | 1720   | 1162  | 1452   |
| 150                                | 2485   | 1250  | 1485   |
| 175                                | 2253   | 1259  | 1430   |
| 200                                | 1982   | 1218  | 1219   |
| 225                                | 1752   | 970   | 1224   |
| 250                                | 1535   | 1041  | 1270   |
| 275                                | 1354   | 1246  | 1306   |
| 300                                | 1216   | 1268  | 1164   |

симось, полученная после нагрева и выдержки этого же образца в муфельной печи при температуре 300 °С. После удаления указанным способом влаги из образца зафиксирован значительно меньший уровень удельной теплоемкости при температурах выше 100 °С. Представлена также зависимость после последующей выдержки этого образца в течение суток при «комнатной» температуре. Можно предположить, что за это время произошло некоторое увеличение влажности, что отразилось в виде незначительного роста уровня рассматриваемого показателя.

Для проведения последующего теплотехнического анализа принята зависимость удельной теплоемкости от температуры для исходного материала в диапазоне температур от 25 до 300 °С (см. табл. 2) и значение коэффициента теплопроводности при 25 °С, равное 0,278 Вт/(м·К).

Наличие экспериментальной информации, представленной на рис. 2, позволяет уточнить значения эффективных ТФХ плит «ПРОЗАСК Файерпанель» во всем рабочем диапазоне температур, решая некое подобие обратной задачи теплопроводности. При этом по аналогии с [27] использовалась упомянутая ранее методика и компьютерная программа «Огнезащита. Версия ВУ.2» [11, 29], предназначенная для расчетов температурных полей в многослойной пластине. Проводимые ранее параметрические исследования с использованием этой программы показали, что значительно меньшее влияние на прогрев конструкций оказывает удельная теплоемкость материала, чем коэффициент теплопроводности. Аналогичная информация содержится, например, в [24, 25]. Это также принималось во внимание в [27], где решалась подобная обратная задача теплопроводности, но только по оценке коэффициента теплопроводности материала при высоких температурах, а величина удельной теплоемкости задавалась постоянной.

Для исследуемых плит использовались результаты определения этого параметра на приборе в диапазоне температур от 20 до 300 °С (см. табл. 1), а при более высоких температурах принималось его значение, как при температуре 300 °С (1216 Дж/(кг·К)). Для уточнения значений эффективного коэффициента теплопроводности принималось его линейное изменение от значения 0,278 Вт/(м·К), определенного на приборе при 25 °С, до его искомого значения при условной температуре 1200 °С. Оно находится в ходе решения обратной задачи методом перебора при варьировании значений искомого параметра при этой температуре.

В ходе решения такой обратной задачи как и в [27] использовалось граничное условие 1-го рода, и в этом качестве брали временные зависимости

температуры на нагреваемой поверхности образцов, зафиксированные в ходе испытаний на стенде лучистого нагрева (красные кривые на рис. 2). Далее проводились расчеты с использованием полученных таким образом ТФХ плит. В результате серии расчетов установлено, что удовлетворительное соответствие «расчет–эксперимент» достигается при значении искомого коэффициента эффективной теплопроводности при температуре 1200 °С, равном 0,31 Вт/(м·К). Зависимость для его определения во всем диапазоне температур имеет вид:  $\lambda_{\text{эф}} = 0,278 + 0,0000267 \cdot (T - 25)$ , где  $T$  — температура, °С.

Степень соответствия «расчет–эксперимент» при указанных выше значениях ТФХ демонстрируется в табл. 1 и на рис. 2, где, наряду с экспериментальными, нанесены расчетные зависимости (пунктирные кривые), демонстрирующие изменение от времени температуры стальной пластины и температуры на границах между слоями плит. Следует отметить их хорошее соответствие, практически для всех экспериментов, несмотря на существенные отличия по толщине огнезащиты, а также по режимам высокотемпературного воздействия на нее в ходе испытаний.

Таким образом, данный случай явно отличается от ситуации исследований базальтоволоконного материала в [26, 27]. Там «потребовалось» значительное увеличение коэффициента теплопроводности при температуре 1200 °С по сравнению с его величиной при относительно низких температурах. Но это было связано с тем, что при высоких температурах для высокопористых материалов возрастает роль лучистой составляющей эффективного коэффициента теплопроводности, но, главное, происходит «деградация» базальтоволоконного материала (оплавление волокон, появление пустот и пр.). Это не характерно для исследуемых плит, которые имеют относительно низкую пористость и сохраняют целостность при нагреве.

Как и ожидалось, наибольшее отличие между расчетными и экспериментальными кривыми отмечается в начальный период нагрева, когда в наибольшей степени сказывается влияние влаги на прогрев образцов (см. рис. 3, 5), поскольку применяемая достаточно простая расчетная методика не учитывает всю совокупность происходящих при нагреве материала сложных процессов. Но это не столь важно для практики, поскольку основной задачей было получение соответствия при относительно продолжительном воздействии, т.е. тогда, когда влияние таких процессов нивелируется. В некоторых случаях расчетные значения температуры превышают экспериментальные и дают «оценку

сверху», что вполне допустимо при проектировании огнезащиты.

Для подтверждения правомерности использования в подобных случаях граничного условия 1-го рода была проведена дополнительная серия расчетов. Задавалось изменение температуры газовой среды по стандартному и углеводородному режимам и задавались общепринятые параметры теплообмена ее с огнезащитой (условие 3-го рода с учетом лучистой и конвективной составляющей). Для образцов фиксированной толщины были получены кривые изменения температуры, в том числе для поверхности огнезащиты и для стальной пластины. Можно отметить, что расчетные кривые для поверхности незначительно отличались от задаваемых и фиксируемых при испытаниях образцов. Далее проводились расчеты при использовании граничного условия 1-го рода, в качестве которого использовались именно эти расчетные зависимости для температуры поверхности. Сравнивались температуры стальной пластины, рассчитанные для этих двух вариантов граничных условий. Получено их близкое соответствие (отличие менее 1%), что подтверждает правомерность используемого подхода.

Следует отметить, что подобным образом удастся определять более реальные значения и характер изменения от температуры ТФХ конструктивной огнезащиты, чем при определении таких «эффективных» характеристик, например, в соответствии с EN 13381-4:2013. Они являются параметрами согласования «расчет–эксперимент», и на «своеобразный» характер их изменения влияют многочисленные факторы, на имеющие отношения к ТФХ материалов. В их числе: наличие полостей под огнезащитой в виде короба для конструкций из двутавров, швеллеров и т.д. и особенности теплопередачи в них, влияние влаги, содержащейся в плитах, возможность растрескивания, разрушения и уменьшения толщины огнезащиты и пр.

Вышеизложенное свидетельствует, что полученные предложенным нами способом значения ТФХ вполне допустимо использовать при проведении теплотехнических расчетов конструкций с огнезащитой из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Причем имеется возможность последующего уточнения этих характеристик в ходе подобных исследований. Возможна также обработка представленных результатов измерений другими исследователями и другим способом. В любом случае испытания на стенде лучистого нагрева являются важным дополнением к огневым экспериментам и способствуют проведению более качественного анализа и обобщения их результатов.

Следует упомянуть также о проведении целого ряда других испытаний плит «ПРОЗАСК Файер-

панель» в специализированных лабораториях. В их числе климатические исследования в МГСУ и испытания на морозостойкость в испытательном центре ВНИИЖЕЛЕЗОБЕТОН. Кроме того, в профильной лаборатории Российского университета транспорта (МИИТ) определялись физико-механические свойства и, в частности, прочность на изгиб. На их основе выдано заключение о достаточной прочности и возможности использования плит в железнодорожных тоннелях и тоннелях метрополитена в жестких условиях аэродинамических воздействий от проходящих в них поездов. Высокую деформационную стойкость рассматриваемых плит (способность к изгибу) следует отметить особо. Именно недостаточный уровень этого показателя может приводить к нарушению целостности (разрушению) огнезащитных плит (облицовок) при огневом воздействии и деформации защищаемых конструкций при действии на них эксплуатационных нагрузок. Поэтому испытания в огневых печах при таких нагрузках обязательны не только для оценки огнестойкости самих конструкций, но и для подтверждения эффективности использования конкретных огнезащитных плит.

Такие испытания конструкций с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» проводятся в должном объеме. В статье рассмотрены некоторые из огневых экспериментов, а также результаты теплотехнического анализа их результатов с проведением расчетов и использованием указанных выше значений ТФХ плит.

Прежде всего можно отметить, что была проведена серия из трех испытаний на огнестойкость в ИЦ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ образцов колонн из двутавра № 40Ш1 (СТО АСЧМ 20-93) с огнезащитой плитами при воздействии постоянной статической нагрузки 195,22 кН (19,9 тс). Приведенная толщина металла (отношение площади поперечного сечения профиля к обогреваемому периметру) составляла 5,93 мм. Монтаж плит проводился на каркас из оцинкованного профиля с дополнительными металлическими уголками при помощи самонарезающих винтов DIN № 7982 48×25 мм.

Два эксперимента проведены с огнезащитой из трех слоев плит толщиной  $3 \times 12,5 = 37,5$  мм. В первом случае при воспроизведении стандартного режима огневого воздействия на момент окончания испытаний (185 мин) вертикальная деформация образца не превысила 12,1 мм при ее предельно допустимом уровне в 27 мм. Средняя температура по термопарам, установленным на поверхности стальных колонн, составляла 675 и 659 °С. Предел огнестойкости по потере несущей способности конструкции составил не менее 185 мин (соответствует классу R180).

Во втором эксперименте в условиях углеводородного режима на момент окончания испытаний (153 мин) вертикальная деформация образцов не превысила 12 мм, а их температура составляла 646 и 630 °С. Предел огнестойкости по потери несущей способности конструкции составил не менее 153 мин (соответствует классу R150). В этих двух случаях зафиксировано образование и раскрытие трещин на наружном и среднем слоях плит с частичным отслоением наружного слоя.

Третий эксперимент проведен с однослойной огнезащитой толщиной 12,5 мм при стандартном режиме. Предел огнестойкости первого образца был достигнут на 78-й мин вследствие потери несущей способности (вертикальная деформация превысила предельную — 27 мм). Температура образца составляла 665 °С. На момент окончания испытаний второго образца (63 мин) его вертикальная деформация не превысила 8 мм, а температура составляла 510 °С. Предел огнестойкости составил не менее 63 мин (соответствует классу R60). Зафиксировано растрескивание и частичное отслоение огнезащитной плиты.

Кроме того, проводились огневые эксперименты ненагруженных колонн № 20Б1 СТО АСЧМ 20-93 по оценке огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель» при различной толщине огнезащиты (от 20,5 до 37,5 мм). Фиксировалось время достижения конструкциями температуры

500 °С при воздействии на нее по стандартному режиму.

Этот показатель наиболее удобен для проведения сопоставления «расчет–эксперимент». Такое сопоставление проведено для этих, а также для упомянутых выше огневых экспериментов при воздействии нагрузки. Теплотехнические расчеты проводились с учетом реального температурного режима в огневой печи, толщины огнезащиты, приведенной толщины стальной конструкции и ее начальной температуры. Использовались уточненные в статье значения ТФХ исследуемых плит. Информация об огневых испытаниях по оценке огнезащитной эффективности плит, а также об испытаниях на огнестойкость нагруженных колонн представлена в табл. 3. Здесь же приведены результаты расчетов времени достижения конструкциями температуры 500 °С.

Кроме того, в этой таблице представлена информация по испытаниям на огнестойкость опытных образцов балки из двутавра № 30Б1 СТО АСЧМ 20-93 с трехслойной огнезащитой толщиной 37,5 мм (3×12,5 мм) при стандартном режиме огневого воздействия. Верхняя (необогреваемая) поверхность образцов изолировалась минераловатной плитой. Приведенная толщина металла составляла 3,95 мм. Для монтажа плит вокруг балки выполнялся стальной каркас из тонколистовых оцинкованных профилей.

**Таблица 3.** Информация об огневых испытаниях колонн и балки с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель»

**Table 3.** Information about the fire tests of columns and beams that have PROSASK Firepanel fireproofing

| Колонна<br>Column            | Испытательный центр<br>Testing centre    | Приведенная толщина, мм<br>PTM, mm | Толщина огнезащиты, мм<br>Thickness of fire proofing, mm | Нагрузка, кН<br>Loading, kN | Время достижения температуры 500 °С, мин<br>Time to reach a temperature of 500 °C, min |                              | Предел огнестойкости<br>Fire resistance limit |
|------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------|--|------------------------------|---|
|                              |  |                                    |  |                             | эксперимент<br>experiment  | расчет<br>calculation        |   |
| 40SH1 STO<br>ASCHM<br>20-93  | ИЦ ВНИИПО<br>Testing center<br>VNIIPPO   | 5,93                               | 12,5   | 195,22                      | 62   | 40                           | R60   |
|                              |  | 5,93                               | 37,5   | 195,22                      | 150  | 129                          | R180  |
|                              |  | 5,93*                              | 37,5*  | 195,22*                     | 115*   | 106*                         | R150*   |
| 20B1 STO<br>ASCHM<br>20-93   | ИЦ ВНИИПО<br>Testing center<br>VNIIPPO   | 3,4                                | 20,5   | –                           | 52   | 45,2                         | –   |
|                              |  | 3,4                                | 25   | –                           | 61   | 56,7                         | –   |
|                              |  | 3,4                                | 37,5   | –                           | 94   | 94,3                         | –   |
| 20B1 STO<br>ASCHM<br>20-93   | ИЦ «Огнестойкость»<br>IC “Ogne-stoycost” | 3,4                                | 12,5   | –                           | 33   | 27,1                         | –   |
| 30B1 STO<br>ASCHM<br>20-93** | ИЦ ВНИИПО<br>Testing center<br>VNIIPPO   | 3,95**                             | 37,5**   | 81,63**                     | более 150**<br>more than 150**   | порядка 100**<br>order 100** | R150**  |

\* Воздействие по углеводородному режиму для несущей колонны.

\*\* Испытания несущей балки.

\* Effect on a loaded column in the hydrocarbon mode.

\*\* Loaded beam testing.

Действовала постоянная статическая нагрузка, сосредоточенная в середине пролета балки 81,63 кН (8321 кг). При испытаниях прогиб образцов не превысил 19,2 мм, что значительно ниже предельного для данной балки уровня (200 мм). Выявлены следующие особенности поведения огнезащитных плит: зафиксировано появление трещин на внешнем слое плит на 55–60-й минуте, а на 115–125-й минуте — раскрытие образовавшихся трещин без разрушения плит. На момент окончания огневого воздействия (155 мин) средняя температура по термопарам, установленным на нижней полке двутавра, составила 446 °С, а на стенке двутавра — 393 °С. Установлено соответствие классу R150.

Сопоставление «расчет–эксперимент» показало следующее. Как правило, расчетное время достижения конструкциями температуры 500 °С меньше, чем зафиксированное при огневых испытаниях. Это свидетельствует о том, что они дают «оценку сверху» и такие расчеты при таких ТФХ плит могут использоваться в ходе проектирования огнезащиты и оценки огнестойкости защищаемых конструкций. Только в одном случае (колонна 20Б1 с огнезащитой толщиной 37,5 мм) получены практически одинаковые величины сравниваемого показателя. Большой уровень расчетных температур конструкций по сравнению с экспериментальными можно объяснить влиянием полостей при варианте исполнения огнезащиты в виде короба. Влияние термического сопротивления таких полостей может, в принципе, учитываться при расчетах по двумерной схеме (в отличие от одномерной с использованием понятия «приведенная толщина металла»). Для балки, кроме того, имеет место теплопередача через слой теплоизоляции у верхней полки, что демонстрирует, в частности, меньший уровень температуры стенки двутавра, по сравнению с нижней его полкой.

Результаты проведенного теплотехнического анализа с сопоставлением «расчет–эксперимент» показали, что может ставиться и обоснованно решаться задача по пересчету результатов огневых экспериментов на другие конструкции и условия

с увязкой таких параметров, как: нормативный предел огнестойкости, приведенная толщина и критическая температура стали, минимальная толщина огнезащиты. Как следует из нормативных документов, такой пересчет правомерен для конструкций, аналогичных тем, для которых проводились испытания на огнестойкость под нагрузкой. Несомненно, полезным дополнением к ним являются огневые испытания по оценке эффективности средств огнезащиты. При этом, как показано в статье, необходимо уделять должное внимание теплотехническим расчетам, оценке эффективности огнезащиты, а также уточнению ее теплофизических характеристик с использованием результатов дополнительных испытаний образцов относительно небольших размеров при лучистом нагреве.

### Выводы

На примере плит «ПРОЗАСК Файерпанель» продемонстрирована целесообразность оценки эффективности конструктивной огнезащиты при испытаниях образцов на стенде лучистого нагрева, на котором с достаточной точностью воспроизводились и фиксировались условия воздействия на огнезащиту и температурные поля в работающей огнезащите. Показана роль теплотехнических расчетов по надежной методике, а также возможность определения эффективных ТФХ плит в рабочем диапазоне температур с использованием результатов термометрических измерений при испытаниях образцов. Получены данные о влиянии влаги, содержащейся в плитах, на особенности их прогрева. Демонстрирована целесообразность и представлены результаты теплотехнического анализа результатов серии испытаний в огневых печах по оценке эффективности огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и огнестойкости защищаемых ими конструкций. Предложен подход и представлены результаты, способствующие повышению качества проектирования огнезащиты и решению задачи по обоснованному переносу результатов, полученных при огневых испытаниях, на другие условия.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пехотиков А.В., Павлов В.В. Средства огнезащиты для стальных конструкций, актуальные вопросы при их применении, оценка технико-эксплуатационных характеристик // Промышленные покрытия. 2015. № 5–6. С. 30–34.
2. Сосков А.А., Пронин Д.Г. Огнезащита стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 57–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23851087>
3. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файрборд // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
4. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 8–17. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16
5. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Reserch features of tunnel lining with innovation fireproof

- panels // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
6. *Пронин Д.С., Конин Д.В.* Проблемы применения стальных и железобетонных несущих конструкций высотных зданий с точки зрения их огнестойкости // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 1. С 50–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57
  7. *Коротков Р.В.* Пожарная безопасность: огнезащита несущих металлических конструкций зданий // *Вестник государственной экспертизы*. 2018. № 1. С. 46–47.
  8. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В.* Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipro.pb.2020.101.4.004
  9. *Гравит М.В., Шабунина Д.Е.* Штукатурные составы как огнезащита стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 3. С. 46–55. DOI: 10.25257/FE.2022.3.46-55
  10. *Полевода И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С.* Огнестойкость железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 2. С. 67–81. DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81
  11. *Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В.* Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 1. С. 21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39
  12. *Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С.* Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 3. С. 45–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64
  13. *Kwon In-Kyu, Kwon Young-Bong.* Experimental study on the fire resistance of steel columns protected with fire boards // *International Journal of Steel Structures*. 2012. Vol. 12. Pp. 25–35. DOI: 10.1007/s13296-012-1003-4 URL: 13296-012-1003-4
  14. *Maraveas C., Vrakas A.A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // *Structural Engineering International*. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
  15. *Annerel E., Boch K., Lemaire T.* Passive fire protection end life safety // *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure*. “SEE Tunnel: Promot-
  - ing in SEE Region” ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
  16. *SFPE Handbook of Fire Protection*. Fifth edition. Hurley J. (Ed.). 2016. Morgan. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
  17. *The passive fire protection handbook*. Chapter 3. Structural steel. Etex building performance. 2017. 71 p. URL: iteassets/construction/page-assets/global/tools--services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e
  18. *Kowalski R.* The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
  19. *Новак С.В., Круковский П.Г., Григорьян Н.Б.* Оценка огнезащитной способности вермикулитоцементной плиты «Эндотерм 210104» стандартизированными методами // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1 (3). С. 11–19.
  20. *Mahmud H.M.I., Mandal A., Nag S., Moinuddin K.A.M.* Performance of fire protective coatings on structural steel member exposed to high temperature // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021. Vol. 12. Pp. 193–211. DOI: 10.1108/JSFE-07-2020-0025
  21. *蒋首超, 吴弘宸.* 钢结构围护-防火一体化材料耐火性能试验研究 // *建筑钢结构进展*. 2021. Vol. 23(01). Pp. 77–84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010 (*Цзян Шоу Чао, У Хун Чэнь.* Экспериментальные исследования показателей огнестойкости огнезащитного интегрированного материала ограждения стальной конструкции // *Прогресс строительства металлоконструкций*. 2021. Т. 23. № 01. С. 77–84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010).
  22. *Hua N., Khorasani N., Tessari A., Ranade R.* Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 127. P. 103504. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103504
  23. *Zehfuß J., Sander L.* Gypsum plasterboards under natural fire — Experimental investigations of thermal properties // *Civil Engineering Design*. 2021. Vol. 3. Issue 8. Pp. 1–11. DOI: 10.1002/cend.202100002
  24. *Zhang C., Pintar A., Weigand J.M., Main J.A., Sadek F.* Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103361
  25. *Новак С.В., Дріжд В.Л., Добростан О.В., Новак М.С.* Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму // *Науковий вісник: Цивільний захист*

- та пожарна безпека. 2022. № 1 (13). С. 88–110. DOI: 10.33269/nvcs.2022.1.88-110
26. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даптиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтового материала МБОР на стенде лучистого нагрева // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 28–39. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.06.28-39
27. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольчинкин А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огне- и теплозащиты композиционных материалов в условиях высокотемпературного воздействия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 84–96. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-96
28. Пронин Д.Г., Тимонин С.А., Голованов В.И. СТО АРСС 11251254.001-018-03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных облицовок. М. : АРСС, 2018. 70 с.
29. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Программные комплексы для расчетов тепломассопереноса в строительных конструкциях с огнезащитой с учетом термического разложения, вспучивания–усадки и испарения–конденсации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2001. Т. 10. № 4. С. 9–11.
30. 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
31. Волков А.А., Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Федоров В.Ю. Влияние влажности строительных материалов на точность расчетов прогрева конструкций при оценках их огнестойкости // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, в рамках VI Межд. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 207–212.

## REFERENCES

- Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Fire protection for steel structures, topical issues in their application, assessment of technical and operational characteristics. *Promishlennye pokritia/Industrial coatings*. 2015; 5-6:30-34. (rus).
- Soskov A.A., Pronin D.G. Fire protection of steel structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:57-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23851087> (rus).
- Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-fireboard plates. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).
- Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25:60-70. (rus).
- Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Reserch features of tunnel lining with innovation fireproof panels. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1651-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
- Pronin D.G., Konin D.V. Problems of application of steel and reinforced concrete bearing structures for tall buildings with respect to their fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(1):50-57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57 (rus).
- Korotkov R.V. Fire safety: fire protection of load-bearing metal structures of buildings. *Bulletin of State Expertise*. 2018; 1:46-47.
- Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
- Gravit M.V., Shabunina D.E. Plaster compositions as fire protection of steel structures at oil and gas facilities. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 3:46-55. DOI: 10.25257/FE.2022.3.46-55
- Polevoda I.I., Zhamoidik S.M., Nekhan D.S. Fire resistance of reinforced concrete columns with structural fire retardance. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya/Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 2:67-81. DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81
- Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P., Marchenkova S.V., Pavlov V.V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):21-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39 (rus).
- Garashchenko A.N., Antonov S.P., Danilov A.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):45-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64 (rus).
- Kwon In-Kyu, Kwon Young-Bong. Experimental study on the fire resistance of steel columns protected with fire boards. *International Journal of Steel Structures*. 2012; 12:25-35. DOI: 10.1007/s13296-012-1003-4 URL: 13296-012-1003-4
- Maraveas Ch., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering Interna-*

- 2021; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
15. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assembly*. Dubrovnik, Croatia, 2015. 2015; 1-10.
  16. *SFPE Handbook of Fire Protection. Fifth edition*. Hurley J. (Ed.). Morgan. Springer. 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
  17. *The passive fire protection handbook*. Chapter 3. Structural steel. Etex building performance. 2017; 71. URL: [iteassets/construction/page-assets/.global/tools-services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e](https://iteassets/construction/page-assets/.global/tools-services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e)
  18. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. *Procedia Engineering*. 2017. 193:27-34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
  19. Novak S.V., Krukovsky P.G., Grigoryan N.B. Evaluation of the flame-retardant ability of the vermiculite-cement plate "Endotherm 210104" by standardized methods. *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta pozhezhna bezpeka/Scientific bulletin — Civil Protection and fire safety*. 2017; 1(3):11-19. (rus).
  20. Mahmud H.M.I., Mandal A., Nag S., Moinuddin K.A.M. Performance of fire protective coatings on structural steel member exposed to high temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021; 12:193-211. DOI: 10.1108/JSFE-07-2020-0025
  21. 蒋首超, 吴弘宸. 钢结构围护-防火一体化材料耐火性能试验研究. *建筑钢结构进展*. 2021; 23(01):77-84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010 (Jiang S., Wu H. An experimental investigation on the fire resistance of the integrated envelope-fire protection material for steel buildings. *Progress of Building Steel Structure*. 2021; 23:77-84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010). (chn).
  22. Hua N., Khorasani N., Tessari A., Ranade R. Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs. *Fire Safety Journal*. 2022; 127:103504. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103504
  23. Zehfuß J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire — Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*. 2021; 3(8):1-11. DOI: 10.1002/cend.202100002
  24. Zhang C., Pintar A., Weigand J.M., Main J.A., Sadek F. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021; 123:103361. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103361
  25. Novak S., Drizhdg V., Dobrostan O., Novak M. Influence of thermophysical characteristics of fire-retardant materials on the thermal state of steel columns under standard temperature regime *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta pozhezhna bezpeka — Scientific bulletin/ Civil Protection and fire safety*. 2022; 1(13):88-110. DOI: 10.33269/nvcz.2022.1.88-110 (ukr).
  26. 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).
  27. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Kobylkov N.V., Nikolchenkin A.A., Antipov E.A. Experimental and computational modeling of fire and thermal protection composite materials under high-temperature exposure. *Aviation Materials and Technologies*. 2022; 3(68): 84-96. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-96
  28. Pronin D.G., Timonin S.A., Golovanov V.I. *STO ARSS 11251254.001-018-03. Design of fire protecting loaded steel constructions using different facings*. Moscow, ARSS, 2018; 70. (rus).
  29. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. Software for simulation of temperature fields in fire resistant building constructions with taking into account the processes of thermal decomposition, intumescence – shrinkage and avaporation – condensation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
  30. 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
  31. Volkov A.F., Roytman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.U. Influence of building materials humidity on heating calculation accuracy at fire protecting grade. *Systemotechnique of building. Cyberphysique building systems : Collection of materials of the seminar held within the framework of the VI International Scientific Conference*. Moscow, MGSU, 2018; 207-212. (rus).

Поступила 24.10.2022, после доработки 21.11.2022;  
принята к публикации 28.11.2022

Received October 24, 2022; Received in revised form November 21, 2022;  
Accepted November 28, 2022

**Информация об авторах**

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

**АНТОНОВ Сергей Порфирьевич**, директор, ПРОЗАСК, Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 42, стр. 1; соискатель на ученую степень кандидата наук, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

**ВИНОГРАДОВ Александр Всеволодович**, начальник лаборатории, канд. техн. наук, Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения, Россия, 141371, г. Хотьково, ул. Заводская; РИНЦ ID: 597524; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**Гарашенко А.Н.** — *научное руководство, участие в проведении испытаний на стенде лучистого нагрева и анализе экспериментальной информации, проведение и анализ результатов расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.*

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

**Виноградов А.В.** — *руководство, обеспечение и участие в проведении испытаний образцов на стенде лучистого нагрева и анализе экспериментальной информации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

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

**Sergey P. ANTONOV**, Director, PROZASK, LLC, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; Applicant for the Degree of Candidate of Sciences, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

**Aleksandr V. VINOGRADOV**, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Chief, Central Research Institute for Special Machinery, Zavodskaya St., Khotkovo, 141371, Russian Federation; ID RISC: 597524; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Anatoliy N. Garashchenko** — *scientific guidance, participation in conducting tests at the radiant heating stand and analyzing experimental information, conducting and analyzing calculation results, writing the source text, final conclusions.*

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

**Aleksandr V. Vinogradov** — *leadership, support and participation in conducting fire experiments and analyzing of experimental information.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

## Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде)

Дмитрий Александрович Корольченко ✉, Татьяна Юрьевна Еремина,  
Сергей Викторович Пузач, Федор Александрович Портнов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Стальные конструкции при высокотемпературном воздействии деформируются, теряют устойчивость и несущую способность, в результате чего происходит обрушение конструкций с последующим обрушением здания. Известно, что для увеличения пределов огнестойкости стальных конструкций до R 90 и R 120 часто используют вспучивающиеся краски. Но огнезащитная эффективность вспучивающихся красок при длительной эксплуатации недостаточно изучена, и применение такого вида огнезащитной обработки для несущих стальных конструкций требует обоснования. Для обеспечения устойчивости здания с требуемым пределом огнестойкости конструкций актуальным является изучение технологических факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций со вспучивающимися красками на водной основе.

**Цель работы.** Разработка подходов к моделированию номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины на водной основе. Были решены следующие задачи:

- построены блок-схемы исследования для получения фундаментальных взаимосвязей динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия;
- разработаны математические модели зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов на основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов;
- построены номограммы зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности огнезащитных материалов на водной основе.

**Методы исследования.** Для анализа теплофизических характеристик огнезащитных материалов использовали анализатор термических констант Hot Disk TPS 1500. С помощью термического анализа производилось исследование свойств огнезащитных материалов, а также происходящих в них физико-химических преобразований при программированном воздействии температуры и с применением специализированной аппаратуры термического анализа. Изучение эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций проводилось в соответствии с ГОСТ Р 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».

**Результаты и их обсуждение.** В результате исследований был разработан подход к прогнозированию огнестойкости строительных конструкций в виде построения блок-схемы исследования, на основании которой производится выбор функциональных критериев. На основе получения экспериментальных исследований возможно построение математических зависимостей огнестойкости от показателей, которые являются функциональными критериями. В частности, при оценке огнестойкости стальных конструкций проводится прогнозирование на основе теплофизических показателей. В работе впервые предложено введение функции огнезащитного материала в стандартный расчет огнестойкости при решении статической и теплофизической задач. На основе полученных данных приведены уравнения зависимости толщины сухого слоя огнезащитного материала от требуемого предела огнестойкости конструкции и номограмма прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины.

**Выводы.** По итогам проведенных исследований получены фундаментальные взаимосвязи динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия. На основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов разработана математическая модель зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов.

**Ключевые слова:** огнестойкость строительных конструкций; расчет предела огнестойкости; математическое моделирование; несущая способность; средства огнезащиты

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретическая и экспериментальная разработка новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенной и биогенной угроз» #FSWG-2020-0007)

Для цитирования: Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 30–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46

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

## Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water)

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Tatyana Yu. Eremina, Sergey V. Puzach, Fedor A. Portnov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** High temperatures cause deformation of steel structures which also lose stability and the bearing capacity, resulting in the collapse of structures with the subsequent collapse of the building. It is understood that intumescent paints are often used to increase the fire-resistance limits of steel structures up to R 90 and R 120. However the fire protection effectiveness of intumescent paints has not been sufficiently studied for the case of the long-term operation, and the application of this type of fire protection treatment of bearing steel structures requires justification. To ensure the building stability, coupled with the required fire resistance limit of structures, one should study the engineering factors affecting the fire resistance of steel structures that have intumescent paint coatings.

**Purpose of the research work.** Development of approaches to simulation of nomograms demonstrating the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses. The research work solved the following tasks:

- block diagrams of the research undertaking were developed to find the fundamental relationships between the dynamics of change in the structure of fire protection materials under thermal effects and the fire resistance limit of a building structure based on the choice of the functional criterion;
- mathematical models demonstrating dependence between the thickness of the dry layer of fire-retardant material were developed; the required fire resistance limit and thermo-physical characteristics of fire-resistant materials based on the experimental studies of the properties and effectiveness of fire-resistant materials were identified;
- nomograms showing dependences between the thickness of the dry layer of flame retardant materials and the flame retardant efficiency of flame retardants were made.

**Research methods.** Hot Disk TPS 1500 thermal constant analyzer was used to analyze the thermo-physical characteristics of flame retardant materials. Thermal analysis was used to study the properties of flame retardants, as well as physical and chemical transformations occurring inside them under the programmed exposure to temperature effects and with the use of specialized thermal analysis equipment. The study of the fire protection efficiency for steel structures was conducted in accordance with GOST R (Russian State Standard) 53295–2009 “Fire protection means for steel structures. General requirements. The method of fire protection efficiency determination”.

**Results and their discussion.** As a result of the research, an approach to prediction of the fire resistance of building structures was developed in the form of a research flowchart, used to choose the functional criteria. Experimental studies were conducted to identify mathematical dependences between the fire resistance and the indicators, which serve as functional criteria. In particular, when assessing the fire resistance of steel structures, a prediction is made on the basis of thermos-physical indicators. The authors were first to propose the introduction of the function of fire protection materials into the standard pattern of fire resistance analysis in the course of solving static and thermo-physical problems. The obtained data were used to make equations of dependence between the thickness of a dry layer of a fire-retardant material, the required fire-resistance limit of a structure, and the nomogram showing the heating of protected steel structures with fire-retardant coatings of various thicknesses.

**Conclusions.** The results of the studies allowed identifying fundamental relationships between the dynamics of change in the structure of fire-retardant materials under the thermal effect and the fire resistance limit of a building structure on the basis of the choice of a functional criterion. Experimental studies of the properties and effectiveness of fire-resistant materials were conducted to develop a mathematical model showing dependence between the thickness of the dry layer of fire-resistant materials, the required fire-resistance limit and thermo-physical characteristics of fire-resistant materials.

**Keywords:** fire resistance of building structures; analysis of the fire resistance limit; mathematical modelling; bearing capacity; fire protection materials

**Acknowledgments:** this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project «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:** Korolchenko D.A., Eremina T.Yu., Puzach S.V., Portnov F.A. Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):30-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46

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

## Введение

Стальные конструкции при высокотемпературном воздействии деформируются, теряют устойчивость и несущую способность, в результате чего происходит обрушение конструкций с последующим обрушением здания [1, 2].

Поведение защищенных стальных конструкций зависит от теплофизических характеристик сухого слоя огнезащитных покрытий:  $\lambda$  (теплопроводность),  $\rho$  (плотность),  $C_p$  (теплоемкость) с учетом высокотемпературного воздействия [3].

Известно, что начало обрушения несущих стальных конструкций может происходить через 10–15 мин после начала пожара в стандартном режиме. Предотвращение обрушения возможно с увеличением предела огнестойкости конструкций и здания в целом за счет нанесения огнезащитных покрытий на металлические конструкции. В настоящее время рынок огнезащитных материалов для стальных конструкций достаточно обширен и каждый из продуктов в данной области должен быть подвергнут подтверждению огнезащитных свойств [4].

В.И. Голованов пишет, что оценка огнестойкости строительных конструкций производится двумя способами: испытанием и расчетом, с учетом температурного режима стандартного пожара, который характеризуется следующей зависимостью:

$$T - T_0 = 345 \lg(8\tau + 1),$$

где  $T$  — среднеобъемная температура, соответствующая времени  $t$ , °С;

$T_0$  — температура до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

$\tau$  — время, исчисляемое от начала огневого воздействия, мин.

Эффективность огнезащитных средств для стальных конструкций определяется временем нагрева двутавровой колонны, без приложения статической нагрузки на образец, до усредненной критической температуры стали 500 °С. Затем с учетом времени прогрева стали огнезащитное покрытие относится к соответствующей группе огнезащитной эффективности.

Определение предела огнестойкости расчетным методом основывается на результатах огневых испытаний аналогичных конструкций с учетом толщины покрытия, теплотехнических и высокотемпературных

характеристик огнезащитных покрытий ( $\lambda$  (теплопроводность),  $\rho$  (плотность),  $C_p$  (теплоемкость)).

Толщина огнезащитного покрытия — один из основных показателей, влияющих на прогрев стальных конструкций.

При высокотемпературном воздействии коэффициент температуропроводности огнезащитных покрытий изменяется в зависимости от их состава и температуры:

$$\alpha = \frac{\lambda_t}{c_t \rho_0}, \quad \text{м}^2/\text{с},$$

где  $\lambda_t$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

$c_t$  — теплоемкость, Дж/(кг·град);

$\rho_0$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Огнезащитные вспучивающиеся краски при нагревании выделяют парообразные вещества и образуют на защищаемой поверхности тонкий непрозрачный слой, который вспучивается при определенной температуре, и толщина его увеличивается в 50–100 раз. Вспучивающиеся краски на водной и органической основе наносят на поверхность стальных конструкций слоем толщиной до 3 мм. При температуре 170–220 °С покрытие вспучивается с образованием пористого термоизоляционного слоя. Пористый слой с низкой теплопроводностью предотвращает быстрый нагрев защищаемых конструкций.

Известно, что для увеличения пределов огнестойкости стальных конструкций до R 90 и R 120 часто используют вспучивающиеся краски. Но огнезащитная эффективность вспучивающихся красок при длительной эксплуатации недостаточно изучена, и применение такого вида огнезащитной обработки для несущих стальных конструкций требует обоснования.

Для обеспечения устойчивости здания с требуемым пределом огнестойкости конструкций не более R 30 актуальным является изучение технологических факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций со вспучивающимися красками на водной основе [5, 6].

**Цель работы** — разработка подходов к моделированию номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины на водной основе.

### Задачи:

1. Построение блок-схемы исследования для получения фундаментальных взаимосвязей динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестой-

кости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия.

2. Проведение экспериментальных исследований для определения теплофизических характеристик (теплоемкости, теплопроводности), эксплуатационных характеристик (плотность, кратность вспучивания) огнезащитного покрытия на водной основе.

3. Разработка математической модели зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов на основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов.

4. Построение номограмм зависимостей толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности огнезащитных материалов на водной основе.

### Теоретическая часть

Исходной фундаментальной зависимостью для решения задачи прогнозирования эффективности средств огнезащиты для строительных материалов и конструкций является подход к расчетной оценке пределов огнестойкости, основанный на решении статической и теплотехнической задачи [7, 8] (рис. 1 и 2).

Огнезащитные вспучивающие материалы в зависимости от типа связующего, наполнителей и добавок имеют большое разнообразие [9–12]. Для того чтобы учесть большое разнообразие средств огнезащиты для металлических конструкций, принято решение — в качестве функциональных критериев не использовать параметры, учитывающие компонентный химический состав огнезащитных материалов. Оптимальным вариантом является использование в даль-

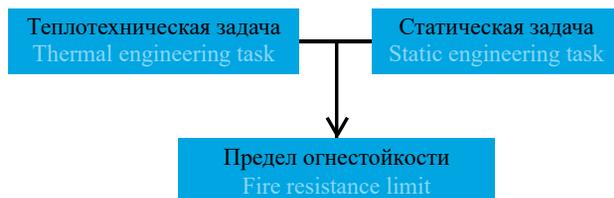


Рис. 1. Оценка предела огнестойкости расчетным методом  
Fig. 1. Using the method of analysis to evaluate the fire resistance limit

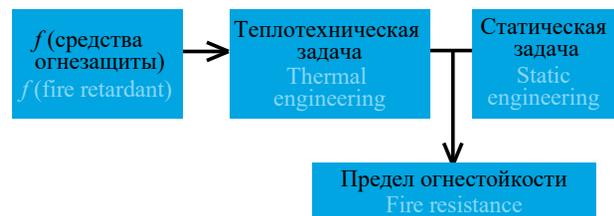


Рис. 2. Оценка предела огнестойкости с использованием функции средства огнезащиты  
Fig. 2. Using the fire retardant function to evaluate the fire resistance limit

нейшей работе теплотехнических характеристик: теплоемкости, теплопроводности, тепловых эффектов химических реакций. Кроме того, необходимо учесть и структурные характеристики: плотность и кратность вспучивания огнезащитных материалов [13].

Авторами предложена блок-схема для исследования средств огнезащиты для металлических конструкций (рис. 3).

Кроме параметров, учитывающих поведение огнезащитных материалов в условиях высокотемпературных воздействий, следует также учитывать эксплуатационные характеристики, определяемые

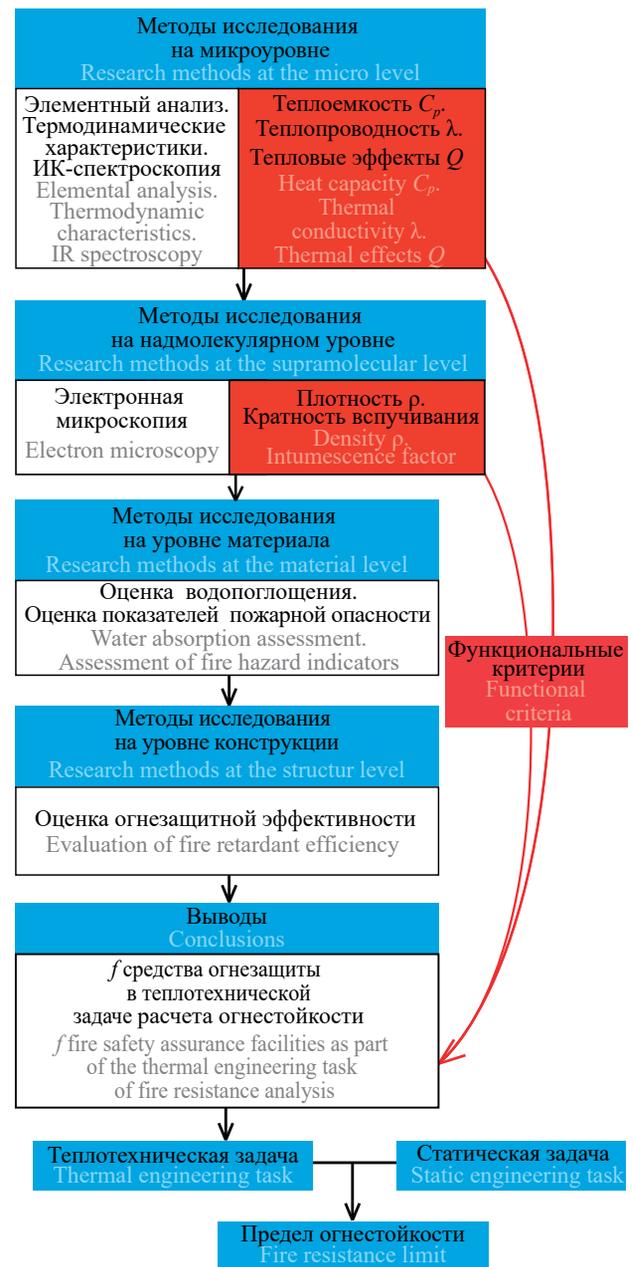


Рис. 3. Блок-схема для исследования параметров средств огнезащиты для металлических конструкций и материалов  
Fig. 3. The block diagram for the study of fire safety parameters for metal structures and materials

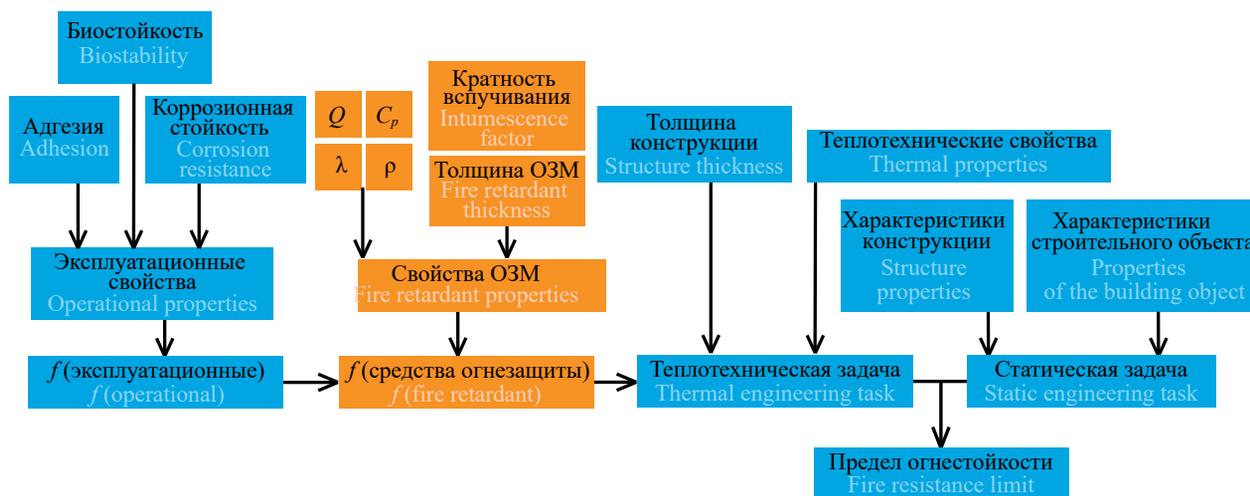


Рис. 4. Блок-схема выбора для металлических конструкций с применением функции средства огнезащиты  
 Fig. 4. Choice-making block diagram for metal structures using the function of the fire safety assurance facility

устойчивостью средств огнезащиты к механическим воздействиям, коррозии, а также к длительным воздействиям окружающей среды (долговечностью). Кроме этих характеристик большой актуальностью пользуются также параметры, связанные с эксплуатацией средств огнезащиты в различных климатических условиях, а также для различных видов поверхностей, что также может быть проработано [14–24] (рис. 4).

Построенный алгоритм предлагает прогнозировать поведение огнезащитных материалов с использованием их теплотехнических характеристик в условиях воздействия высоких температур.

**Методы исследования**

**Анализ теплофизических характеристик**

Анализаторы термических констант Hot Disk TPS 1500, «Hot Disk AB», диапазон определения теплопроводности в нестационарном режиме 0,01–400 Вт/(м·К), температуропроводности 0,01–100 мм<sup>2</sup>/с удельной объемной теплоемкости вплоть до 5 МДж/(м<sup>3</sup>·К), погрешность определения



Рис. 5. Анализатор термических констант Hot Disk TPS 1500  
 Fig. 5. Hot Disk TPS 1500 thermal constant analyzer

теплопроводности ± 5 % (сертификат о калибровке № 5130 м до 01.08.2021) (рис. 5) взаимодействует с плоским сенсором (рис. 6), который состоит из электропроводящей двойной спирали, выполненной из тонкой никелевой фольги. Эта спираль зажата между двумя тонкими листами изолирующего материала (каптон или слюда в зависимости от температуры измерения).

В процессе эксперимента плоский сенсор помещают между двумя одинаковыми образцами так, чтобы сенсор касался их поверхностей. Сенсор является как источником тепла, так и динамическим термометром. Это достигается за счет того, что по спирали сенсора пропускается электрический ток, которого



Рис. 6. Плоский сенсор Hot Disk: материал изоляции каптон (слева) и слюда (справа)  
 Fig. 6. Hot Disk flat sensor: captone insulation material (left) and mica (right)

достаточно, чтобы повысить температуру сенсора от долей до нескольких градусов, при этом одновременно фиксируется увеличение температуры как функция от времени. Вследствие увеличения температуры сопротивление сенсора меняется, что сопровождается перепадом напряжения. Прибор фиксирует изменения в напряжении и силе тока в течение определенного промежутка времени и точно рассчитывает тепловой поток между сенсором и исследуемым образцом.

Для измерения увеличения сопротивления сенсора используется электрический мост. Через этот сбалансированный мост при помощи чувствительного вольтметра определяется увеличение сопротивления сенсора в процессе считывания дисбаланса в напряжении.

### Термический анализ (ТА)

Представляет собой совокупность методов, с помощью которых производится исследование свойств веществ и материалов, а также происходящие в них физико-химические преобразования при программированном воздействии температуры

и с применением специализированной аппаратуры термического анализа [25–29] (рис. 7).

В работе использовался метод термогравиметрии для оценки потери массы образца в процессе терморазложения, метод дифференциального термоанализа для установления величины тепловых эффектов химических реакций в процессе терморазложения. На основании полученных результатов также устанавливалась величина температуры, при которой происходило вспучивание огнезащитных материалов.

### Огневые испытания

Исследование эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций проводилось в соответствии с ГОСТ Р 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».

В качестве испытательного оборудования использовалась малогабаритная печь, предназначенная для исследования огнезащитной эффективности средств огнезащиты, нанесенных на образцы — колонны двутаврового сечения (рис. 8).

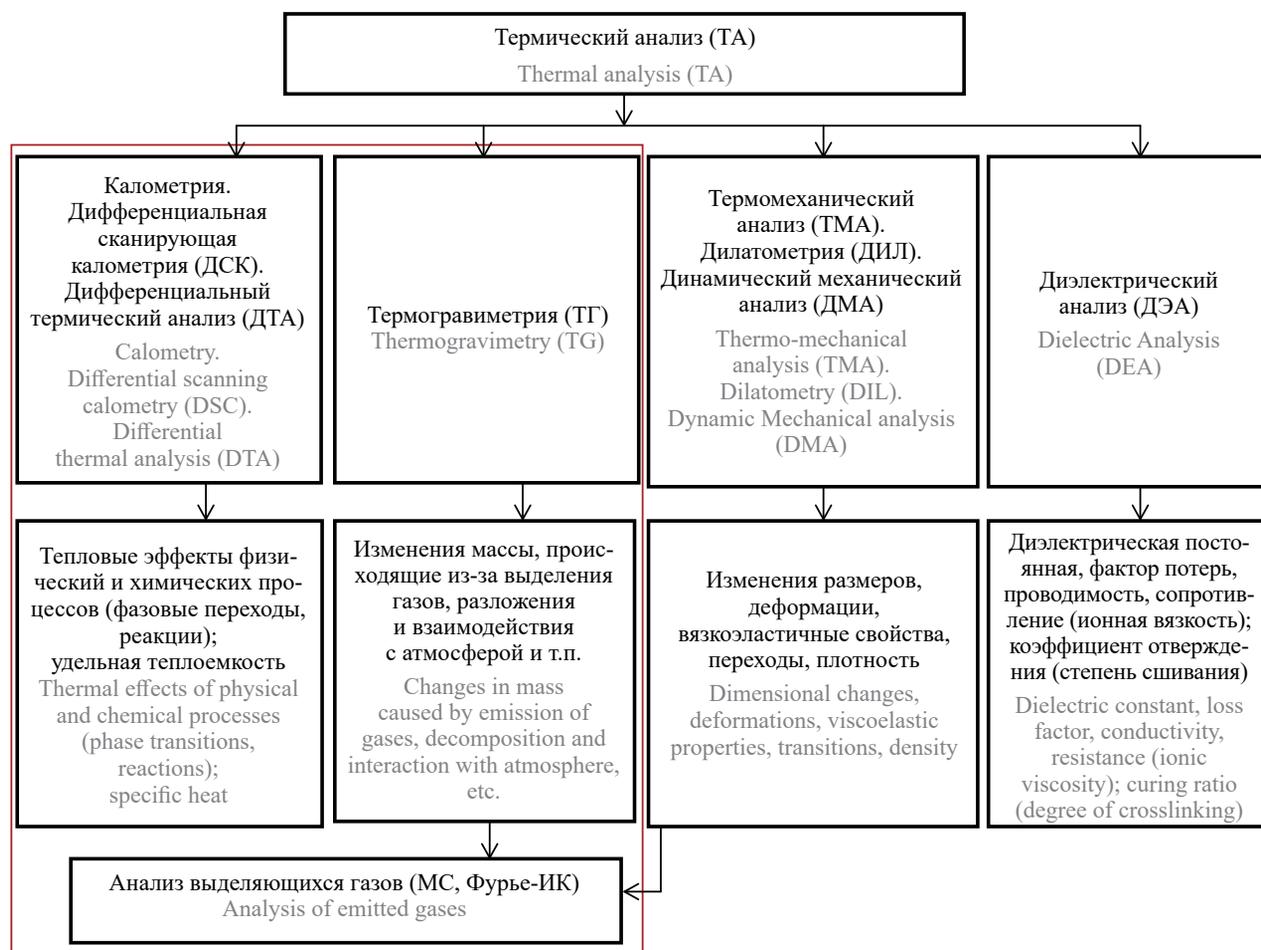


Рис. 7. Методы термического анализа (ТА)

Fig. 7. Thermal analysis (TA) methods

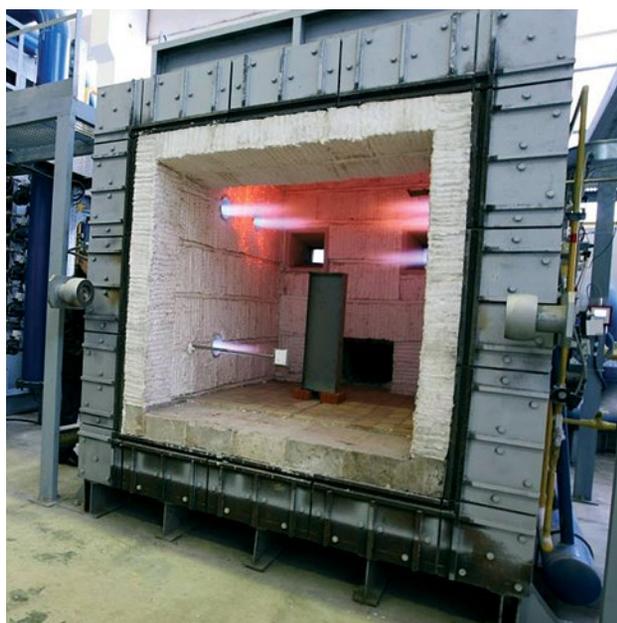


Рис. 8. Малогабаритная печь  
Fig. 8. Small-size furnace

В процессе проведения испытаний регистрировались следующие показатели:

- время наступления предельного состояния образца (достижение критической температуры);
- за предельное состояние принято достижение стальной поверхности образца критической температуры в 500 °С в среднем в контрольных точках образца;
- поведение огнезащитного состава (вспучивание, обугливание, отслоение, появление трещин, выделение дыма, продуктов горения и т.д.).

**Метод оценки кратности вспучивания**

Коэффициент вспучивания огнезащитных покрытий определялся по методике оценки огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации, разработанной ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Образец покрытия размером 200 × 200 мм помещают в термошкаф при температуре 600 °С и выдерживают в течение 5 мин для получения вспученного слоя. Коэффициент вспучивания  $K_{вс}$  определяется как отношение толщины вспученного слоя  $h$  к исходной толщине покрытия  $h_0$ :

$$K_{вс} = h/h_0. \tag{1}$$

Измерение  $h$  и  $h_0$  проводится в сечениях пяти образцов. Коэффициент вспучивания определяется как среднеарифметическое пяти измерений.

**Образцы для испытаний**

Для проведения экспериментального исследования поведения вспучивающихся составов в усло-

Таблица 1. Перечень используемых образцов  
Table 1. List of specimens used

| Образец №<br>Specimen No. | Краткая характеристика<br>Brief description   |
|---------------------------|---|
| 1                         | Огнезащитный состав на водной основе с отвердителем<br>Water based fire retardant composition with hardener |
| 2                         | Огнезащитный состав на водной основе<br>Water based fire retardant composition                              |
| 3                         | Огнезащитный состав на водной основе<br>Water based fire retardant composition                              |

виях огневого воздействия были использованы составы, отличающиеся связующими компонентами, отвердителями и т.п., приведенные в табл. 1.

**Результаты испытаний**

Результаты экспериментальных исследований в соответствии с заявленным планом приведены в табл. 2–5 и на рис. 6–20.

Фото огневых испытаний образцов приведены на рис. 9–14.

Графики результатов термического анализа образцов 15–17 приведены на рис. 15–17.

**Обсуждение результатов**

Огнезащитные вспучивающиеся краски при нагревании выделяют паробразные вещества

Таблица 2. Характеристики и эффективность огнезащитных материалов для стальных конструкций

Table 2. Characteristics and effectiveness of fire retardant materials for steel structures

| Образец №<br>Specimen No. | Толщина защитного слоя, мм<br>Thickness of the protective layer, mm | Кратность вспучивания, раз<br>Intumescence factor, times | Температура начала вспучивания, °С<br>Intumescence triggering temperature, °C | Время достижения предельного состояния, мин<br>Time to the limit state, min |
|---------------------------|---|--|---|---|
| 1                         | 6,3   | 50   | 268   | 45 (ПТМ 5,8)<br>45 (PTM 5.8)  |
| 2                         | 2   | 16   | 220   | 30 (ПТМ 5,8)<br>30 (PTM 5.8)  |
| 3                         | 2   | 17   | 230   | 15 (ПТМ 3,4)<br>15 (PTM 3.4)  |

**Таблица 3.** Теплофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций до терморазложения  
**Table 3.** Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures before thermal decomposition

| Образец №<br>Specimen No. | Образец до терморазложения (20 °С)<br>Specimen before thermal decomposition (20 °C)                        |   |   |   |   |
|---------------------------|--|---|---|---|---|
|                           | Плотность до терморазложения, кг/м <sup>3</sup><br>Density before thermal decomposition, kg/m <sup>3</sup> | Теплофизические характеристики<br>Thermo-physical characteristics |   |   |   |
|                           |  | Тепловая мощность, мВт<br>Thermal power, mW                       | Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)<br>Specific heat capacity, MJ/(m <sup>3</sup> ·K) | Теплопроводность, Вт/(м·К)<br>Thermal conductivity, W/(m·K) | Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)<br>Specific heat capacity, MJ/(m <sup>3</sup> ·K) |
| 1                         | 716  | 40  | 0,954   | 0,202   | 0,212   |
| 2                         | 1395   | 20  | 1,875   | 0,385   | 0,205   |
| 3                         | 1385   | 20  | 2,384   | 0,444   | 0,186   |

**Таблица 4.** Теплофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций при температуре 200 °С  
**Table 4.** Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures at 200 °C

| Образец №<br>Specimen No. | Образец при 200 °С<br>Specimen at 200 °C   |   |   |   |  |
|---------------------------|--|---|---|---|--|
|                           | Плотность при 200 градусах, кг/м <sup>3</sup><br>Density at 200 degrees, kg/m <sup>3</sup> | Теплофизические характеристики<br>Thermo-physical characteristics |   |   |  |
|                           |  | Тепловая мощность, мВт<br>Thermal power, mW                       | Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)<br>Specific heat capacity, MJ/(m <sup>3</sup> ·K) | Теплопроводность, Вт/(м·К)<br>Thermal conductivity, W/(m·K) | Температуропроводность, мм <sup>2</sup> /с<br>Temperature conductivity, mm <sup>2</sup> /s |
| 1                         | 689  | 40  | 0,99  | 0,14  | 0,144  |
| 2                         | 988  | 40  | 1,52  | 0,29  | 0,195  |
| 3                         | 592  | 40  | 2,32  | 0,31  | 0,134  |

и образуют на защищаемой поверхности тонкий непрозрачный слой, который вспучивается при определенной температуре, и толщина его увеличивается в 50–100 раз. Вспучивающиеся краски на водной и органической основе наносят на поверхность стальных конструкций слоем толщиной до 3 мм. При температуре 170–220 °С покрытие вспучивается с образованием пористого термоизоляционного слоя. Пористый слой с низкой теплопроводно-

**Таблица 5.** Теплофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций после терморазложения  
**Table 5.** Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures after thermal decomposition

| Образец №<br>Specimen No. | Образец при 700 °С<br>Specimen at 700 °C   |   |   |   |  |
|---------------------------|--|---|---|---|--|
|                           | Плотность при 700 градусах, кг/м <sup>3</sup><br>Density at 700 degrees, kg/m <sup>3</sup> | Теплофизические характеристики<br>Thermo-physical characteristics |   |   |  |
|                           |  | Тепловая мощность, мВт<br>Thermal power, mW                       | Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)<br>Specific heat capacity, MJ/(m <sup>3</sup> ·K) | Теплопроводность, Вт/(м·К)<br>Thermal conductivity, W/(m·K) | Температуропроводность, мм <sup>2</sup> /с<br>Temperature conductivity, mm <sup>2</sup> /s |
| 1                         | 82   | 80  | 0,109   | 0,123   | 1,130  |
| 2                         | 92   | 80  | 0,227   | 0,066   | 0,291  |
| 3                         | 75   | 80  | 0,412   | 0,212   | 0,284  |

стью предотвращает быстрый нагрев защищаемых конструкций [30, 31].

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы: для образца 1 и образца 2 характерны ярко выраженные экзотермические эффекты в начале теплового воздействия, что характеризует активные термо-



**Рис. 9.** Образец 1 до испытаний  
**Fig. 9.** Specimen 1 before testing



Рис. 10. Образец 1 после испытаний  
Fig. 10. Specimen 1 after testing



Рис. 12. Образец 2 после испытаний  
Fig. 12. Specimen 2 after testing

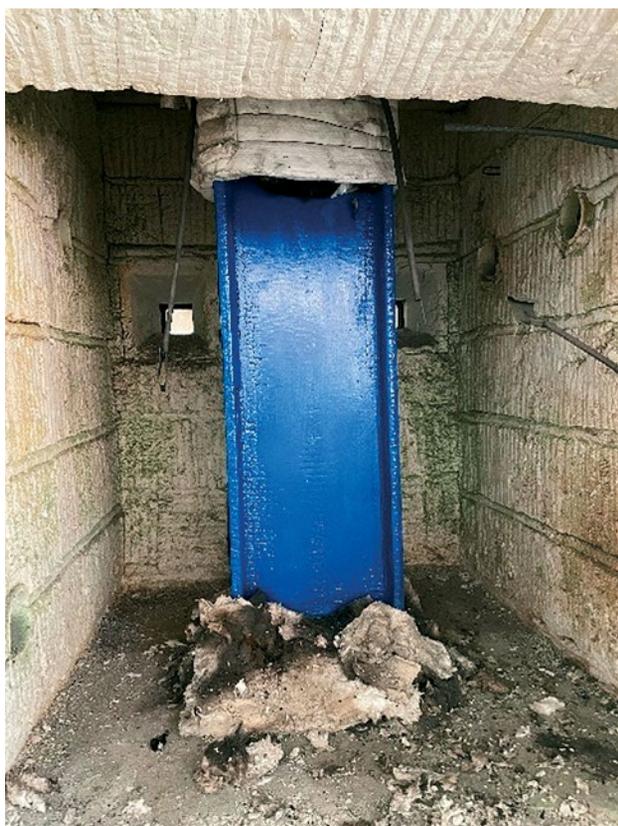


Рис. 11. Образец 2 до испытаний  
Fig. 11. Specimen 2 before testing



Рис. 13. Образец 3 до испытаний  
Fig. 13. Specimen 3 before testing

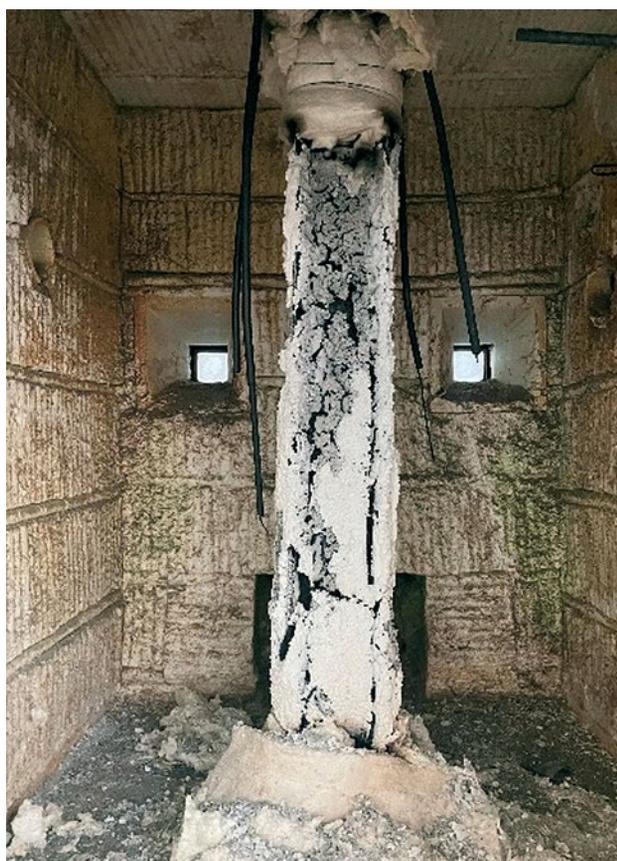


Рис. 14. Образец 3 после испытаний  
Fig. 14. Specimen 3 after testing

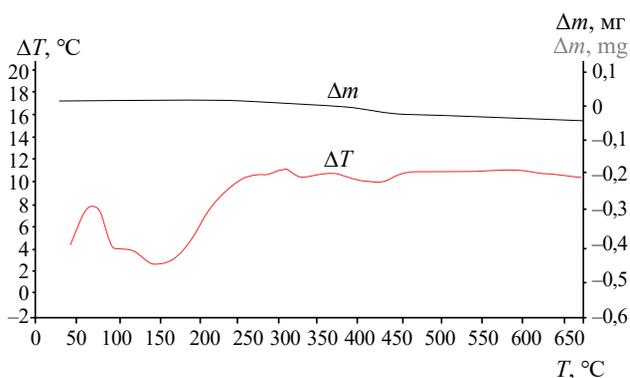


Рис. 17. Термический анализ образца 3  
Fig. 17. Thermal analysis of Specimen 3

окислительные процессы, которые приводят к образованию неустойчивой структуры. При этом для образца 3 характерно наличие меньшего количества выделяемого тепла на начальном этапе, при этом наблюдаются эндотермические эффекты, определяющие устойчивость структуры вспученного слоя, а также охлаждение поверхности. В табл. 6 приведено детальное описание результатов термического анализа.

Поведение составов в процессе эксперимента различается, но в интервалах 35–100 °С происходят размягчение, разогрев, термоокислительный процесс; в интервалах 100–185 °С — экзотермические эффекты; в интервалах 185–255 °С — эндотермические эффекты, от 255 °С — стабилизация. Поэтому для математического моделирования можно рекомендовать данные интервалы.

Исследуемыми теплофизическими характеристиками в рамках оценки поведения огнезащитных материалов являются:  $\lambda$  (коэффициент теплопроводности),  $\rho$  (плотность),  $C_p$  (теплоемкость) с учетом высокотемпературного воздействия. На основании полученных результатов можно заключить, что наиболее стабильный с точки зрения поверхностной структуры состав (образец 1) имеет наименьшую теплопроводность при сравнительно схожих с другими составами значениях теплоемкости.

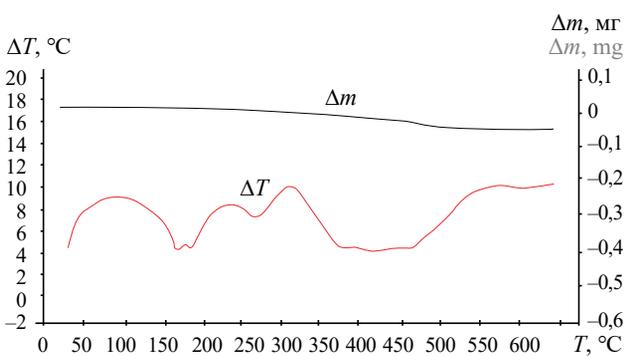


Рис. 15. Термический анализ образца 1  
Fig. 15. Thermal analysis of Specimen 1

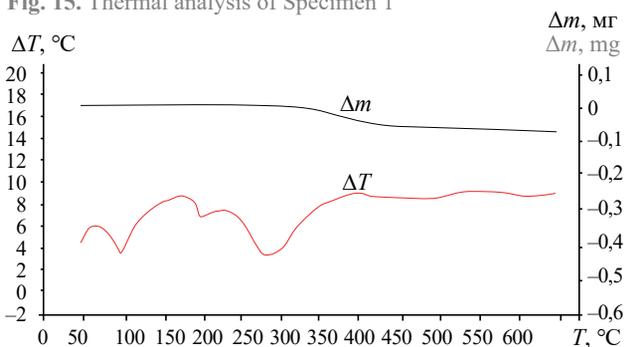


Рис. 16. Термический анализ образца 2  
Fig. 16. Thermal analysis of Specimen 2

Таблица 6. Тепловые эффекты реакции терморазложения  
Table 6. Thermal effects of the thermal decomposition reaction

| Образец №<br>Specimen No.   | Температурный интервал, °С<br>Temperature range, °C |         |         |         |
|---|---|---------|---------|---------|
|   | 20–100  | 100–200 | 200–300 | 300–400 |
| Тепловой эффект химической реакции Q, Дж<br>Heat effect of the chemical reaction Q, J |   |         |         |         |
| 1   | 8,5   | -7,3    | 8,5     | 40,5    |
| 2   | 9,3   | 4,2     | 12,7    | 15,3    |
| 3   | 12,34   | 6,71    | 18,2    | 8,2     |

Эти результаты коррелируются с полученными ранее данными (ДТА и предел огнестойкости). Кроме того, данный образец обладает наибольшей кратностью вспучивания, что при устойчивой структуре обеспечивает наибольшую огнестойкость (не менее 35 мин). Полученные результаты используются для математического моделирования огнезащитных материалов, обладающих заданными эксплуатационными свойствами.

**Математическое моделирование**

В результате экспериментальных исследований проведена аппроксимация данных на основании математического моделирования. Для определения распределения температур внутри стальной конструкции и слоя огнезащиты решается нестационарное одномерное уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \tag{2}$$

- где  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;
- $c$  — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);
- $T$  — температура, К;
- $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);
- $\tau$  — время, с;
- $y$  — координата, направленная по толщине стальной конструкции и слоя (сухого или вспученного) огнезащитного материала, м.

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов.

Используется неявная конечно-разностная схема и метод продольной прогонки.

Величина предела огнестойкости выражается в качестве показателя времени ( $\delta\tau$ ), когда температура стальной конструкции достигнет критического значения 500 °С.

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями стальной конструкции и огнезащитного состава, что является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева стальной конструкции. Впервые применен подобный подход с использованием теплотехнических параметров огнезащитных материалов для стальных конструкций.

Значение толщины сухого слоя огнезащитного материала по оси  $y$  сначала задается постоянным в зависимости от приведенной толщины металла. При достижении температурой огнезащитного материала величины начала вспучивания вышеуказанный шаг изменяется в области вспученного слоя. Величина шага по времени определяется из числа Куранта.

Приведенная математическая задача впервые решалась методом компьютерного моделирования.

**Таблица 7.** Уравнения номограмм требуемой толщины сухого слоя в зависимости от предела огнестойкости

**Table 7.** Equations of nomograms of the required thickness of the dry layer depending on the fire resistance limit

| Образец №<br>Specimen No. | Уравнение зависимости толщины сухого слоя огнезащитного материала от требуемого предела огнестойкости конструкции<br>Equation showing dependence between the thickness of the dry layer of the fireproofing material and the required fire resistance limit of the structure |
|---------------------------|--|
| 1                         | $\delta_c = -4 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,1737R + 0,4752$<br>$\delta_d = -4 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,1737R + 0,4752$   |
| 2                         | $\delta_c = -10^{-4} R^2 + 0,0534R + 0,4368$<br>$\delta_d = -10^{-4} R^2 + 0,0534R + 0,4368$   |
| 3                         | $\delta_c = -2 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,0975R + 0,6956$<br>$\delta_d = -2 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,0975R + 0,6956$   |

Была написана компьютерная программа на языке программирования ФОРТРАН.

В результате численных экспериментов для трех огнезащитных покрытий с различной толщиной сухого слоя  $\delta_c$ , являющейся координатой  $y$  из уравнения теплопроводности (1), были получены зависимости температуры стальной конструкции от времени с начала испытаний при разных пределах огнестойкости. Вышеуказанные зависимости позволили получить зависимости толщины сухого слоя огнезащитных составов от требуемого предела огнестойкости  $R$ . При аппроксимации данных решений уравнения теплопроводности получены уравнения номограмм, представленные в табл. 7.

**Номограмма прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины**

Определение теплотехнических и высокотемпературных характеристик огнезащитных вспучивающихся красок для стальных конструкций связано с построением номограмм прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными вспучивающимися красками различной толщины в зависимости от приведенной толщины металла.

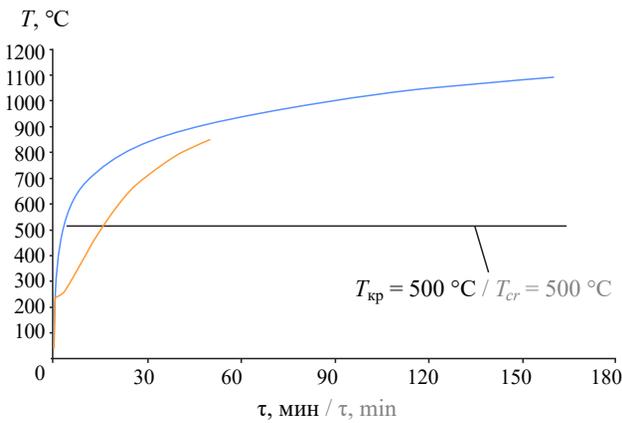
На основании математического моделирования получены номограммы зависимостей толщины сухого слоя от требуемого предела огнестойкости при заданных теплофизических характеристиках исследуемых составов (рис. 18–23).

На основании математического моделирования получены для трех огнезащитных покрытий зависимости температуры стальной конструкции от времени с начала испытаний при разных пределах огнестойкости, а также номограммы зави-

симостей толщины сухого слоя огнезащитных составов от требуемого предела огнестойкости (рис. 18–23).

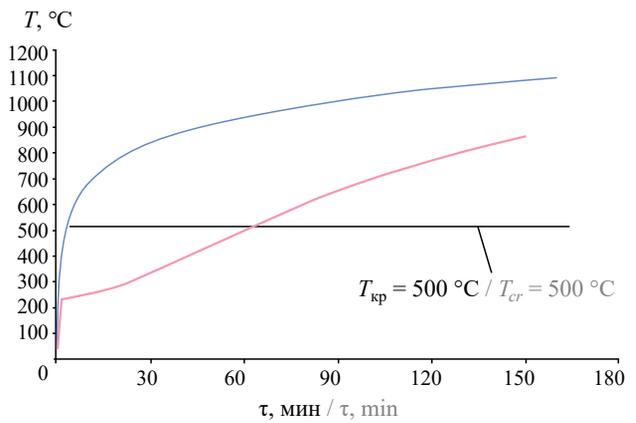
Достоверность расчетного метода подтвержда-

ется сопоставлением результатов расчета температур стальной конструкции с ее экспериментальными значениями (рис. 19, 25–28). Погрешность расчета не превышала 2 %.



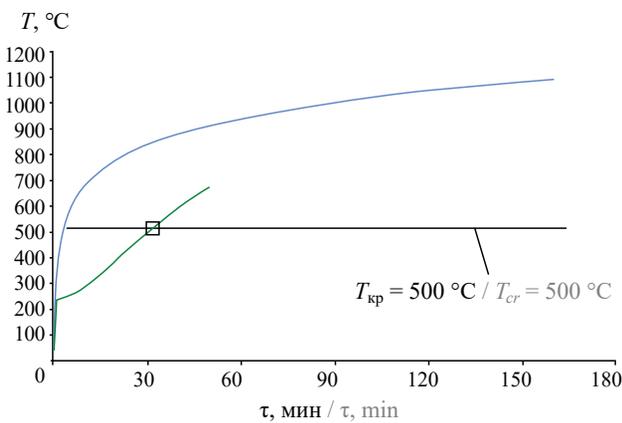
**Рис. 18.** Зависимости температур от времени: Краска Терма, стальная конструкция с приведенной толщиной 3,4 мм. Огнезащитная эффективность 15 мин

**Fig. 18.** Temperature-time dependencies: Terma paint, steel construction with a thickness of 3.4 mm. Fire safety efficiency of 15 min



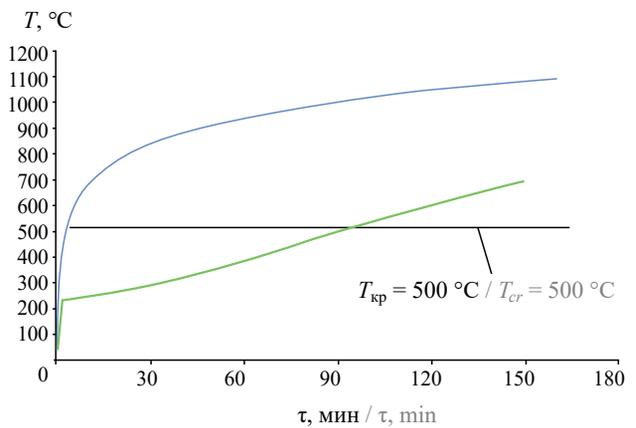
**Рис. 21.** Огнезащитная эффективность 60 мин

**Fig. 21.** Fire safety efficiency of 60 min



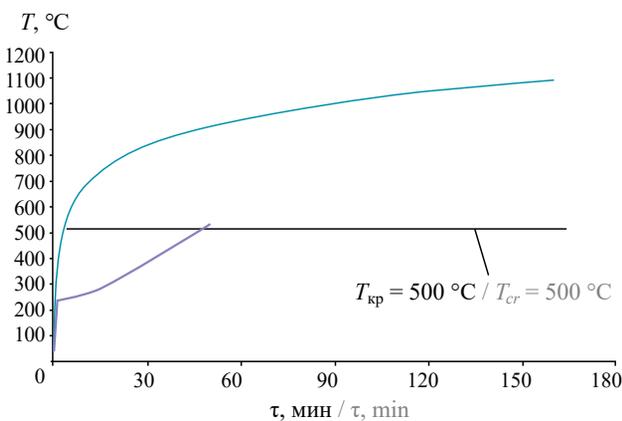
**Рис. 19.** Огнезащитная эффективность 30 мин

**Fig. 19.** Fire safety efficiency of 30 min



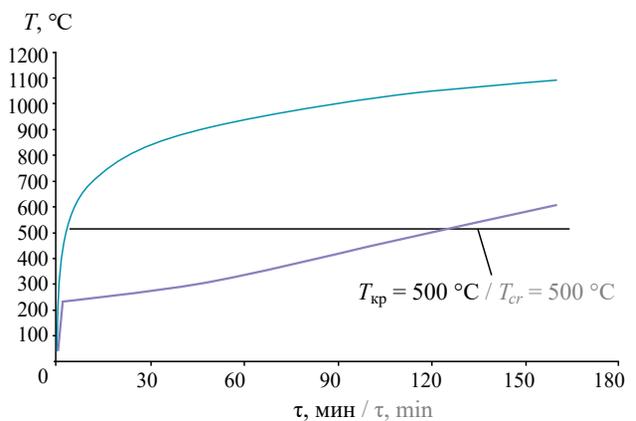
**Рис. 22.** Огнезащитная эффективность 90 мин

**Fig. 22.** Fire safety efficiency of 90 min



**Рис. 20.** Огнезащитная эффективность 45 мин

**Fig. 20.** Fire safety efficiency of 45 min



**Рис. 23.** Огнезащитная эффективность 120 мин

**Fig. 23.** Fire safety efficiency of 120 min

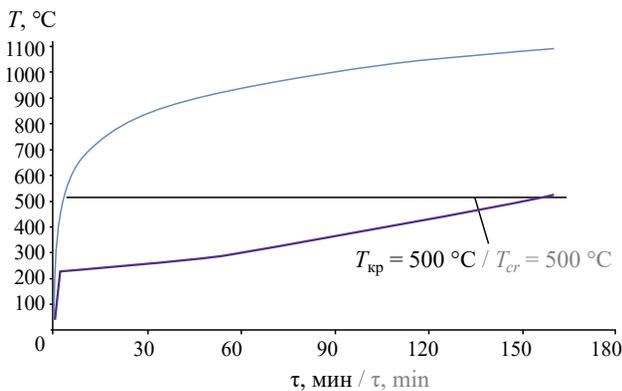


Рис. 24. Огнезащитная эффективность 150 мин  
Fig. 24. Fire safety efficiency of 150 min

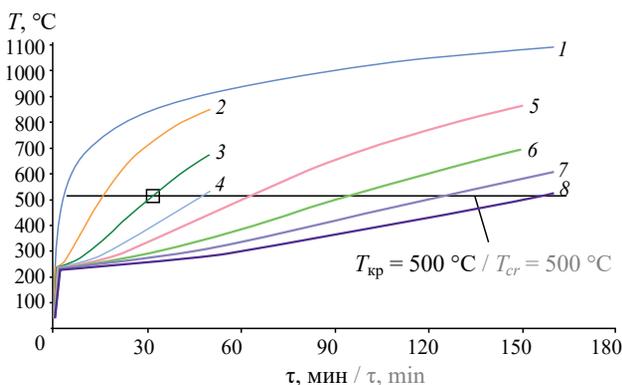


Рис. 25. Зависимости температур от времени с начала пожара: 1 — температура «стандартного» пожара; температура стальной конструкции с приведенной толщиной 3,4 мм, обработанной огнезащитным составом Терма, при огнезащитной эффективности, расчет: 2 — 15 мин; 3 — 30; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; эксперимент: □ — 30 мин

Fig. 25. Dependences between temperatures and the time from the beginning of the fire: 1 — “standard” fire temperature; temperature of the steel structure with a given thickness of 3.4 mm, treated with a fire retardant composition of Terma, for the following cases of the fire safety efficiency, calculation: 2 — 15 min; 3 — 30; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; experiment: □ — 30 min

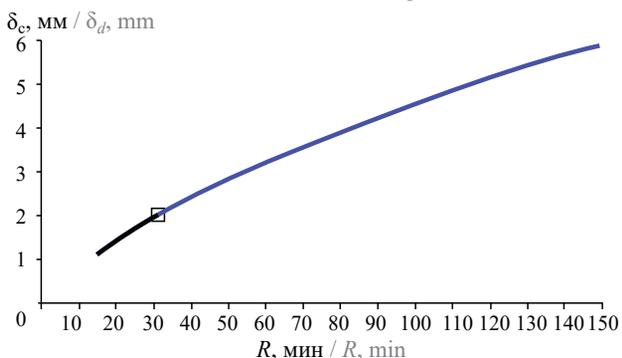


Рис. 26. Зависимость толщины сухого слоя огнезащитного состава Терма, нанесенного на стальную конструкцию с приведенной толщиной 3,4 мм, от огнезащитной эффективности, расчет:  $\delta_c = -10^{-4}R^2 + 0,0534R + 0,4368$ , достоверность аппроксимации 0,9991, где  $\delta_c$  — толщина сухого слоя, мм;  $R$  — огнезащитная эффективность, мин; □ — эксперимент ( $R = 30$  мин)

Fig. 26. Dependence between the thickness of the dry layer of Terma flame retardant composition, applied to the steel structure with a reduced thickness of 3.4 mm, and the fire safety efficiency: calculation:  $\delta_c = -10^{-4}R^2 + 0.0534R + 0.4368$ , reliability of approximation 0.9991; where  $\delta_d$  is the dry layer thickness, mm;  $R$  is the fire safety efficiency, min; □ — experiment ( $R = 30$  min)

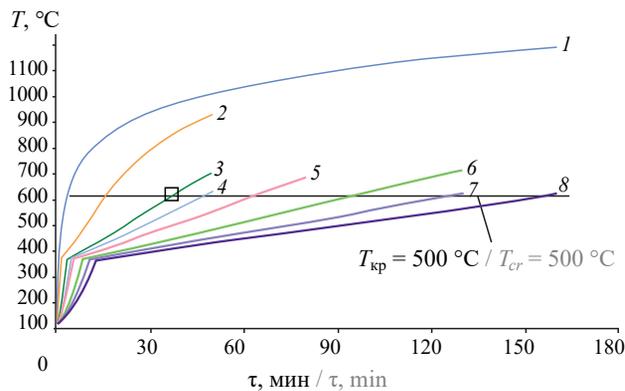


Рис. 27. Зависимости температур от времени с начала пожара: 1 — температура «стандартного» пожара; температура стальной конструкции с приведенной толщиной 3,4 мм, обработанной огнезащитным составом на водной основе с отвердителем, при огнезащитной эффективности, расчет: 2 — 15 мин; 3 — 35; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; эксперимент: □ — 35 мин

Fig. 27. Dependences between temperatures and the time from the beginning of the fire: 1 — “standard” fire temperature; the temperature of the steel structure with a given thickness of 3.4 mm, treated with a water-based flame retardant composition with a hardener to ensure the fire safety efficiency: calculation: 2 — 15 min; 3 — 35; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; experiment: □ — 35 min

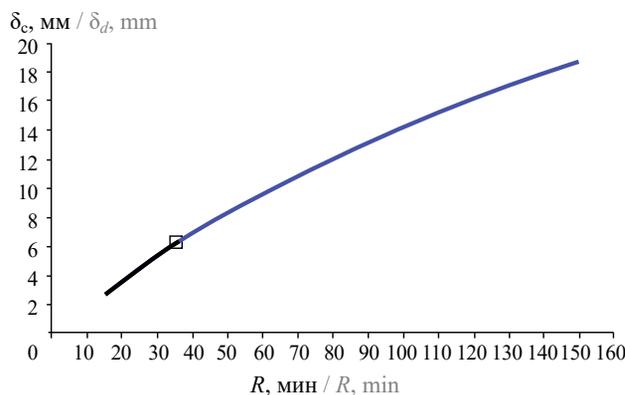


Рис. 28. Зависимость толщины сухого слоя огнезащитного состава на водной основе с отвердителем, нанесенным на стальную конструкцию с приведенной толщиной 3,4 мм, от огнезащитной эффективности: расчет:  $\delta_c = -4 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,1737R + 0,4752$ , достоверность аппроксимации 0,9992; где  $\delta_c$  — толщина сухого слоя, мм;  $R$  — огнезащитная эффективность, мин; □ — эксперимент ( $R = 35$  мин)

Fig. 28. Dependence between the thickness of the dry layer of a water-based fire retardant composition with a hardener, applied to a steel structure with a given thickness of 3.4 mm and the fire safety efficiency analysis:  $\delta_d = -4 \cdot 10^{-4}R^2 + 0.1737R + 0.4752$ , reliability of approximation is 0.9992; where  $\delta_d$  is dry layer thickness, mm;  $R$  is the fire safety efficiency, min; □ — experiment ( $R = 35$  min)

### Выводы

1. По итогам проведенных исследований впервые получены фундаментальные взаимосвязи динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия.

2. С учетом зависимости теплофизических характеристик (теплоемкости, теплопроводности) от структуры (плотность, кратность вспучивания) и температуры огнезащитного покрытия полимерных композиционных материалов (огнезащитных материалов на основе полимерного связующего) разработан новый подход с внедрением «функции огнезащитного материала».

3. На основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов разработана математическая модель зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости

и теплофизических характеристик огнезащитных материалов, а также приведены номограммы зависимостей толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности полимерных композиционных материалов функционального назначения (огнезащитных материалов).

4. Полученные результаты в дальнейшем позволят прогнозировать эффективность огнезащитных материалов исходя из заданных параметров (функциональных критериев). Новый подобный метод позволит решить теплотехническую задачу для оценки пределов огнестойкости различных типов строительных конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Теличенко В.И., Ройтман В.М.* Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара — базовый элемент системы комплексной безопасности // Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации : мат. 1-го Национального конгресса «Комплексная безопасность в строительстве 2010», 18–21 мая 2010 г., Москва, ВВЦ. Вып. 9. М., 2010. С. 15–29.
2. *Ройтман В.М., Приступок Д.Н.* Особенности оценки стойкости зданий и сооружений из железобетонных конструкций при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 7. С. 29–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15188713>
3. *Wang Y., Goransson U., Holmstedt G., Omrane A.* A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. Pp. 235–246. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-235
4. CMD (Construction Market Data). The market for fire protection of steel frames total market (beams and columns) by Types of Fire Protection, Great Britain, 2001–2014. URL: [http://www.cmdgroup.com\\_February\\_2015](http://www.cmdgroup.com_February_2015).
5. *Голованов В.И., Кузнецова Е.В.* Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 82–90. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24229215>
6. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В.* Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
7. *Ушанов В.В., Фадеев В.Е., Харитонов В.С., Щелкунов В.И., Павловский А.В., Косачев А.А.* Огнестойкость и пожарная опасность сэндвич-панелей и предложения по внесению изменений в нормативные правовые акты по пожарной безопасности в части их применения в зданиях и сооруже-
8. *Фадеев В.Е.* Совершенствование современных методов испытаний на огнестойкость на основе внедрения гармонизированных европейских стандартов // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. М. : ВНИИПО, 2016. Ч. 1. С. 305–309. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817893>
9. *Шаталин С.С., Варламов А.В., Зыбина О.А., Мнацаканов С.С.* О связующих в огнезащитных вспучивающихся композициях // Дизайн. Материалы. Технология. 2014. № 4 (34). С. 37–40.
10. *Завьялов Д.Е., Зыбина О.А., Митрофанов В.В., Мнацаканов С.С.* Сравнительное изучение поведения фосфатов аммония в огнезащитных вспучивающихся композициях // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. Вып. 1. С. 157–159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43912070>
11. *Завьялов Д.Е., Нечаев К.В., Зыбина О.А., Бабкин О.Э., Мнацаканов С.С.* Реакции в огнезащитных вспучивающихся красках в присутствии углеродных нанотел // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 10. С. 38–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20274080>
12. *Завьялов Д.Е., Зыбина О.А., Мнацаканов С.С., Чернова Н.С., Варламов А.С.* Огнезащитные вспучивающиеся композиции на основе интеркалированного графита // Химическая промышленность. 2009. Т. 86. № 8. С. 414–417.
13. *Gillet M., Autrique L., Perez L.* Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. Issue 3. Pp. 883–899. DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/030
14. *Бабкин О.Э., Зыбина О.А., Танклевский Л.Т., Мнацаканов С.С.* Диагностика качества нанесения и эффективности коксообразующих огнезащитных покрытий для металлоконструкций // Промышленные покрытия. 2014. № 7–8. С. 50–54.

15. Зыбина О.А., Бабкин О.Э., Танклевский Л.Т., Мнацаканов С.С. Формирование интумесцентного слоя при термоллизе органофосфатаммонийных огнезащитных покрытий // Мир гальваники. 2014. № 5. С. 56–58.
16. Yuan J. Intumescent coating performance on steel structures under realistic fire conditions : Doctor of Philosophy thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2009.
17. Dowling J. Fire protection costs for structural steelwork. New Steel Construction. UK, 2003.
18. Sorathia U., Gracik T., Ness J., Durkin A., Williams F., Hunstad M., Berry F. Evaluation of intumescent coatings for shipboard fire protection // Journal of Fire Sciences. 2003. Vol. 21. Issue 6. Pp. 423–450. DOI: 10.1177/0734904103035393
19. Perez L., Atrique L., Pechoux F. Modelling and experimental testing of intumescent coatings under high thermal flux for military applications // Fire Safety Science. 2014.
20. Roberts T., Shirvill L., Waterton W., Buckland I. Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering // Process Safety and Environmental Protection. 2010. Vol. 88. Issue 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.psep.2009.09.003
21. Kandola B.S., Akonda M.H., Horrocks A.R. Use of highperformance fibres and intumescent as char promoters in glassreinforced polyester composites // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88. Issue 1. Pp. 123–129. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.030
22. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating // Surface and Coating Technology. 2006. Vol. 201. Issue 3–4. Pp. 979–987. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.01.026
23. Andersen J. Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
24. Li G.Q., Lou G.B., Zhang C., Wang L., Wang Y. Assess the fire resistance of intumescent coatings by equivalent constant thermal resistance // Fire Technology. 2012. Vol. 48. Issue 2. Pp. 529–546. DOI: 10.1007/s10694-011-0243-8
25. Omrane A., Wang Y.C., Goransson U., Holmstedt G., Alden M. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence // Fire Safety Journal. Vol. 42. Issue 1. Pp. 68–74. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.006
26. Bartholomai M., Schriever R., Schartel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis // Journal of Fire Materials. 2003. Vol. 27. Pp. 151–162.
27. Zhang Y., Wang Y., Bailey C.G., Taylor A.P. Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 50. Pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.02.004
28. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнацаканов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термоллиза // Журнал прикладной химии. 2009. Вып. 82. № 4. С. 1445–1449. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592>
29. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves // Fire Technology. 2015. Vol. 51. Issue 3. Pp. 627–643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
30. Головина Е.В. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 130 с.
31. Оценка огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации : методика. М. : ВНИИПО, 2014. 31 с.

## REFERENCES

1. Telichenko V.I., Roitman V.M. Ensuring the resilience of buildings and structures under combined special impacts including fire: the basic element of the system of integrated safety. *Rising the safety of buildings and structures during construction and operation : materials Proceedings of the 1st National Congress "Integrated safety in construction 2010", May 18–21, 2010, Moscow, All-Russia Exhibition Center.* Issue 9. Moscow, 2010; 15-29. (rus).
2. Roitman V.M., Prystupyuk D.N. Features of the estimation of buildings and constructions resistance from reinforced concrete designs at the combined hazardous effects with fire participation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2010; 19(7):29-38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15188713> (rus).
3. Wang Y., Goransson U., Holmstedt G., Omrane A. A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter. *Fire Safety Science.* 2005; 8:235-246. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-235
4. CMD (Construction Market Data). The market for fire protection of steel frames total market (beams and columns) by types of fire protection, Great Britain, years 2001–2014. 2015. URL: <http://www.cmdgroup.com>
5. Golovanov V.I., Kuznetsova E.V. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Industrial and Civil Engineering.* 2015; 9:82-90. (rus).

6. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004 (rus).
7. Ushanov V.V., Fadeev V.E., Kharitonov V.S., Shchelkunov V.I., Pavlovsky A.V., Kosachev A.A. Fire resistance and fire hazard of sandwich panels and the proposals on amendments to the normative legal acts on fire safety regarding their application in buildings and structures of various functionality. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 4:119-122. (rus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504>
8. Fadeev V.E. *Improvement of modern methods of fire resistance tests on the basis of the introduction of harmonized European standards. Actual Problems of Fire Safety: Materials of the 28th International Science and Practical Conference*. Moscow, VNIPO, 2016; 1:305-309. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817893> (rus).
9. Shatalin S.S., Varlamov A.V., Zybina O.A., Mnatsakanov S.S. On binders in flame retardant intumescent compositions. *Design. Materials. Technology*. 2014; 4(34):37-40. (rus).
10. Zavyalov D.E., Zybina O.A., Mitrofanov V.V., Mnatsakanov S.S. Comparative study of the behaviour of ammonium phosphates in flame retardant intumescent compositions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012; 85(1):157-159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43912070> (rus).
11. Zavyalov D.E., Nechaev K.V., Zybina O.A., Babkin O.E., Mnatsakanov S.S. Reaction, which take place in the intumescent fire-retardant paints in the presence of carbon nanobodies. *Russian Coatings Journal/Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*. 2012; 10:38-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20274080> (rus).
12. Zavyalov D.E., Zybina O.A., Mnatsakanov S.S., Chernova N.S., Varlamov A.S. Fire-resistant intumescent compositions containing intercalated graphite. *Chemical industry*. 2009; 86(8):414-417. (rus).
13. Gillet M., Autrique L., Perez L. Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007; 40(3):883-899. DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/030
14. Babkin O.E., Zybina O.A., Tanklevskii L.T., Mnatsakanov S.S. Diagnosis of the quality of application and effectiveness of coke-forming flame retardant coatings for metal structures. *Industrial Coatings*. 2014; 7-8:50-54. (rus).
15. Zybina O.A., Babkin O.E., Tanklevsky L.T., Mnatsakanov S.S. Formation of the intumescent layer during thermolysis of organophosphatammonium flame retardant coatings. *Galvanic World*. 2014; 5:56-58. (rus).
16. Yuan J. Intumescent coating performance on steel structures under realistic fire conditions : Doctor of Philosophy thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2009.
17. Dowling J. Fire protection costs for structural steelwork. *New Steel Construction*. UK, 2003.
18. Sorathia U., Gracik T., Ness J., Durkin A., Williams F., Hunstad M., Berry F. Evaluation of Intumescent Coatings for Shipboard Fire Protection. *Journal of Fire Sciences*. 2003; 21(6):423-450. DOI: 10.1177/0734904103035393
19. Perez L., Autrique L., Pechoux F. Modelling and experimental testing of intumescent coatings under high thermal flux for military applications. *Fire Safety Science*. 2014.
20. Roberts T., Shirvill L., Waterton W., Buckland I. Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering. *Process Safety and Environmental Protection*. 2010; 88(1):1-19. DOI: 10.1016/j.psep.2009.09.003
21. Kandola B.S., Akonda M.H., Horrocks A.R. Use of high-performance fibres and intumescent as char promoters in glass-reinforced polyester composites. *Polymer Degradation and Stability*. 2005; 88(1):123-125. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.030
22. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. *Surface and Coating Technology*. 2006; 201(3-4): 979-987. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.01.026
23. Andersen J. *Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark*. Copenhagen, Denmark, 2015.
24. Li G.Q., Lou G.B., Zhang C., Wang L., Wang Y. Assess the fire resistance of intumescent coatings by equivalent constant thermal resistance. *Fire Technology*. 2012; 48(2):529-546. DOI: 10.1007/s10694-011-0243-8
25. Omrane A., Wang Y.C., Goransson U., Holmstedt G., Alden M. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence. *Fire Safety Journal*. 2006; 42(1):68-74. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.006
26. Bartholomai M., Schriever R., Schartel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis. *Journal of Fire Materials*. 2003; 27:151-162.
27. Zhang Y., Wang Y., Bailey C.G., Taylor A.P. Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2012; 50:51-62. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.02.004
28. Zybina O.A., Varlamov A.B., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of intumescent fire-retardant paint-and-varnish formulations in the course of thermolysis. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009; 82(4):1445-1449. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592> (rus).
29. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire*

*Technology*. 2015; 51(3):627-643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7

30. Golovina E.V. *Methodology for the evaluation of thermal resistance of intumescent-type flame retardant compositions for oil and gas facilities : Dissertation*

*of the Candidate of Technical Sciences*. Ekaterinburg, 2019; 130. (rus).

31. *Assessment of fire protection properties of coatings depending on the terms of their operation: a methodology*. Moscow, VNIPO, 2014; 31. (rus).

*Поступила 07.11.2022, после доработки 21.11.2022; принята к публикации 01.12.2022*

*Received November 7, 2022; Received in revised form November 21, 2022; Accepted December 1, 2022*

### Информация об авторах

**КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович**, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

**ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

**ПУЗАЧ Сергей Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**ПОРТНОВ Федор Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors

**Dmitriy A. KOROLCHENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

**Tatyana Yu. EREMINA**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

**Sergey V. PUZACH**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Fedor A. PORTNOV**, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

**Contribution of the authors:** all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# Рационально-целевое развитие системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России

Евгений Владимирович Гвоздев ✉

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

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье рассказывается о системе комплексной безопасности, создаваемой на предприятиях нефтегазового комплекса России (НГК), которая требует постоянного совершенствования и развития. Переход рассматриваемой системы на новый качественный уровень возможен при развитии комплексного междотраслевого подхода, базирующегося не только на использовании научно-технических достижений в области надежности функционирования физических объектов, но и в разработке новых научных результатов для реализации организационно-технических мероприятий в комплексной безопасности предприятий.

**Цели и задачи.** Основная цель данной статьи состоит в улучшении состояния системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России за счет решения задач по рационально-целевому развитию подсистем (промышленной и пожарной безопасности, охраны труда), их перехода на новый качественный уровень развития. Для достижения цели сформулированы 4 задачи, требующие решения.

**Результаты решения задач.** При решении задачи № 1 сделаны выводы:

- средняя доля просуммированных по годам всех совместных событий, наносящих ущерб (аварии и пожары) — около 20 % в год;
- средний экономический ущерб от совместных опасностей (аварии и пожары) — около 40 % общего ущерба в год, т.е. примерно 1,5 млрд руб.;
- средний уровень санитарных и безвозвратных потерь персонала на предприятиях НГК России составляет около 38 %, примерно 300 чел. за год.

При решении задачи № 2 сформулированы понятия для комплексной безопасности, системы комплексной безопасности, рационально-целевого развития системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России.

При решении задачи № 3 представлена модель, позволяющая сравнивать качественные показатели функционирования существующей и развиваемой систем комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России.

При решении задачи № 4 обосновано и продемонстрировано использование новой рационально-целевой модели развития системы КБ на предприятиях НГК России, а также представлен пример, доказывающий адекватность ее использования.

**Выводы.** Применение разработанной рационально-целевой модели развития системы КБ на предприятиях НГК России позволяет на практике решать проблему по снижению ущерба от аварий и пожаров в рассматриваемой системе, т.е. решать проблему, имеющую важное социально-экономическое значение для России.

**Ключевые слова:** рационально-целевая модель; аварии; пожары; коэффициент влияния; ресурсное обеспечение

**Для цитирования:** Гвоздев Е.В. Рационально-целевое развитие системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 47–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.47-55

✉ Гвоздев Евгений Владимирович, e-mail: evgvozdev@mail.ru

## On the rational targeted development of the integrated security system at the enterprises of the oil and gas complex of Russia

Evgeniy V. Gvozdev ✉

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

## ABSTRACT

**Introduction.** The article presents a comprehensive security system created at the enterprises of the oil and gas complex of Russia, which requires constant improvement and development. The transition of the system under

consideration to a new qualitative level is possible with the development of an integrated intersectoral approach based not only on the use of scientific and technical achievements in the field of reliability of the functioning of physical objects, but also in the development of new scientific results for the implementation of organizational and technical measures in the complex security of enterprises.

**Goals and objectives.** The main purpose of the presented article is to improve the state of the integrated safety system at the enterprises of the oil and gas complex of Russia, by solving the tasks of rational and targeted development of subsystems (industrial and fire safety, labor protection), their transition to a new qualitative level of development.

To achieve the goal, 4 tasks requiring solutions are formulated.

#### Results of solving problems.

When solving problem No. 1, conclusions are drawn:

- the average proportion of all joint events summing up by years causing damage (accidents and fires) is about 20 % per year;
- the average economic damage from joint hazards (accidents and fires) is about 40 % of the total damage per year, i.e. about 1.5 billion rubles;
- the average level of sanitary and irretrievable losses of personnel at the enterprises of the NGK of Russia is about 38 %, about 300 people per year.

In solving problem No. 2, the formulated concepts for integrated security, integrated security systems, rational and targeted development of the integrated security system at the enterprises of the oil and gas complex of Russia are presented.

When solving problem No. 3, a model is presented that allows comparing the qualitative indicators of the functioning of existing and developing integrated security systems at the enterprises of the oil and gas complex of Russia.

When solving problem No. 4, the use of a new rational-target model of the development of the CB system at the enterprises of the NGK of Russia is justified and demonstrated, and an example is presented that proves the adequacy of its use.

**Conclusions.** The application of the developed rational-target model for the development of the CB system at the enterprises of the NGK of Russia, allows in practice to solve the problem of reducing damage from accidents and fires in the system under consideration, i.e. to solve a problem of important socio-economic importance for Russia.

**Keywords:** rational-target model; accidents; fires; coefficient of influence; resource provision

**For citation:** Gvozdev E.V. On the rational targeted development of the integrated security system at the enterprises of the oil and gas complex of Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):47-55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.47-55 (rus).

✉ Evgeniy Vladimirovich Gvozdev, e-mail: evgvozdev@mail.ru

## Введение

Важное место в системе безопасного и надежного развития России занимают предприятия, входящие в нефтегазовый комплекс, масштабность и важность отраслевого функционирования которых просто неоспоримы не только в России, но и в любом другом государстве мира. Эффективное функционирование рассматриваемых предприятий НГК играет исключительную роль в создании условий для развития и устойчивого роста национальной экономики. В настоящее время предприятия НГК относятся к основному стратегическому потенциалу развития мировой экономической системы. От их состояния, безопасности, устойчивого функционирования зависят перспективы экономико-социального развития страны, выполнение таких важнейших функций, как защита национального суверенитета и безопасности государства, жизнеобеспечение проживающего в нем населения [1–5].

Снижение ущербов от аварий и пожаров в ведомственных (отраслевых) подсистемах промышленной безопасности (далее — ПрБ), пожарной безопасности (далее — ПБ), охраны труда (далее — ОТ) на предприятиях НГК России сможет наступить в том случае, когда в целом для комплекс-

ной безопасности (далее — КБ) рассматриваемых предприятий будет выбран курс по ее целенаправленному и всестороннему развитию. Развитием безопасности любого предприятия является изменение старого, сформированного годами подхода к ее управлению и внедрение такого нового подхода, который бы опирался на результаты ввода инноваций, передовых знаний в науке, применения новых технологий и т.д. Внедрение нового подхода к управлению безопасностью на предприятии требует разработки соответствующего научно-методического аппарата (моделей, методов, методики и т.д.), позволяющего управлять этим состоянием [6–10].

Устойчивая стабильность функционирования безопасности предприятий НГК России (в отличие от ее развития) — это ее способность не только сохранять свои свойства, противодействуя авариям и пожарам, но и возвращаться в равновесное состояние в случае отклонений. В статье представляется система КБ, созданная на предприятиях НГК России, состоящая из подсистем (ПрБ, ПБ, ОТ) и предназначенная для нейтрализации нестабильности при управлении безопасностью предприятия в условиях ее ресурсных ограничений [11–13]. Ключевая идея в решении проблемы обеспечения качественного уровня без-

опасности на предприятиях НГК России имеет непосредственное отношение к развитию комплексного межотраслевого подхода [14–16], базирующегося не только на использовании научно-технических достижений в области надежности функционирования физических объектов, но и в разработке новых научных результатов для реализации организационно-технических мероприятий при переходе КБ на новый качественный уровень развития [17–19].

Представленные выше обстоятельства характеризуются высокой степенью актуальности, автором статьи предлагается представить обзор по решению научных задач, используемых на практике для безопасного функционирования предприятий НГК России [20].

### Цель и задачи исследования

Цель настоящей статьи — улучшение состояния системы КБ на предприятиях НГК России за счет решения задач по рационально-целевому развитию подсистем (ПрБ, ПБ, ОТ), их перехода на новый качественный уровень развития.

Для достижения сформулированной цели потребовалось решить следующие задачи.

1. Проанализировать статистику возникновения аварий и пожаров за период 2014–2020 гг. на предприятиях НГК России. Представить средние показатели о нанесенных ущербах (год) за рассматриваемый период для совместных событий (аварий и пожаров).

2. Сформулировать понятия для комплексной безопасности, системы комплексной безопасности, рационально-целевого развития системы КБ на предприятиях НГК России.

3. Разработать рационально-целевую модель развития системы КБ на предприятиях НГК России в виде сравнительной модели, представляющей собой существующую (стабильно-функционирующую) и развиваемую системы КБ, представить ее описание.

4. Обосновать и продемонстрировать использование новой рационально-целевой модели развития системы КБ на предприятиях НГК России, а также привести пример, доказывающий адекватность ее использования.

### Решение задачи № 1

С целью проведения дальнейших исследований по определению причин возникновения совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России рассматривалась статистика совместных аварий и пожаров за период 2014–2020 гг., расследование которых проводилось по линии Ростехнадзора<sup>1</sup> и МЧС России<sup>2</sup> (рис. 1). Представляются:

<sup>1</sup> Ростехнадзор. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/>

<sup>2</sup> О представлении карточек учета пожаров: Письмо от начальника ФГБУ ВНИИПО МЧС России № ИГ-117-2212-11-6 от 15.12.2020

- сведения об авариях за период 2014–2020 гг., расследование которых проводил Ростехнадзор (рис. 1);
- сведения о пожарах за период 2014–2020 гг., представленные в виде карточек учета пожаров от ФГБУ ВНИИПО МЧС России (рис. 2).

На основании исходных данных по авариям и пожарам проводилась выборка именно тех предприятий, где в день возникновения аварии происходил пожар. Статистика совместно происшедших аварий и пожаров на предприятиях НГК России приведена (рис. 3).

На основе анализа представленных статистических данных (см. рис. 3) сделаны следующие выводы:

- средняя доля просуммированных по годам всех совместных событий, наносящих ущерб (аварии и пожары) — около 20 % в год;
- средний экономический ущерб от совместных опасностей (аварии и пожары) — около 40 % общего ущерба в год, т.е. примерно 1,5 млрд руб.;
- средний уровень санитарных и безвозвратных потерь персонала на предприятиях НГК России составляет около 38 %, примерно 300 чел. за год.

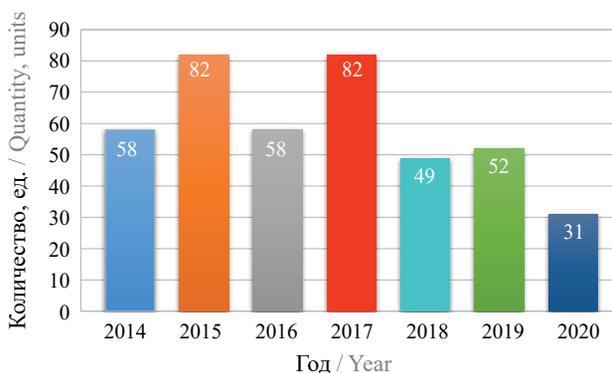


Рис. 1. Статистика аварий на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг.

Fig. 1. Accident statistics at the Russian OGI enterprises in 2014–2020

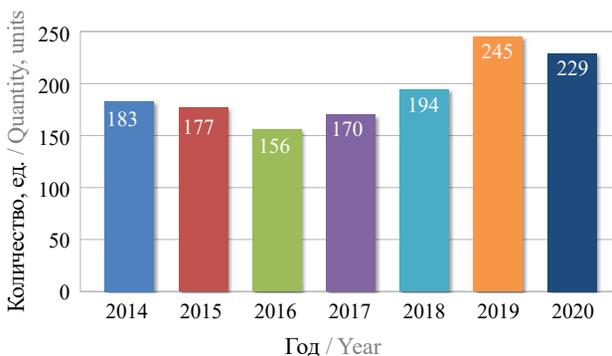


Рис. 2. Статистика пожаров на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг.

Fig. 2. Fire statistics at the Russian OGI enterprises in 2014–2020

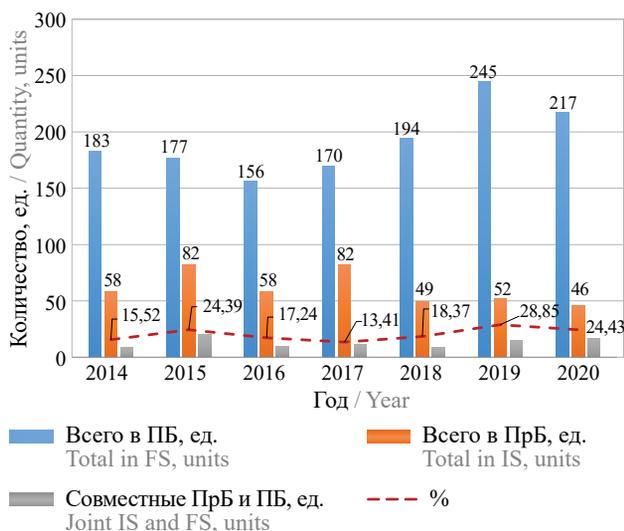


Рис. 3. Доля совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг.

Fig. 3. The share of joint accidents and fires at the Russian OGI enterprises in 2014–2020

Углубленное изучение причинно-следственной связи по нарастанию и возникновению первичных факторов, сила воздействия которых способна нанести ущерб взаимодействующей отраслевой подсистеме (вторичный фактор), позволит в перспективе решать множество задач по профилактике и предупреждению совместных событий, наносящих ущербы (аварий и пожаров).

**Решение задачи № 2**

Для достижения представленной выше цели и задач, входящих в ее содержание и требующих решения, а также для правильного понимания темы статьи, представленной вниманию читательской аудитории, возникла необходимость в использовании нового взгляда на комплексную безопасность предприятий НГК России, под которым следует понимать систему, представляющую собой совокупность взаимодействующих ведомственных (отраслевых) подсистем (промышленной и пожарной безопасности, охраны труда), предназначенную для защиты персонала, имущества, оборудования предприятия и окружающей природной среды от аварий и пожаров. Требуется внести пояснение для сформулированного выше понятия с уточнением по его использованию не только для КБ, но и для системы КБ, потому что в его содержании в качестве ключевого значения представлена «система».

Кроме того, возникла необходимость в использовании нового сформулированного понятия для рационально-целевого развития системы КБ предприятий НГК России, под которым следует понимать научно-обоснованное соотношение рациональных параметров имеющейся ресурсной базы предприятия, используемой для развития

подсистем (ПрБ, ПБ, ОТ) в условиях ограничений. Под ресурсной базой необходимо понимать все, что способствует достижению стратегической цели предприятия (финансовые, материальные, информационные (знаниевые), энергетические, трудовые, организационные и прочие ресурсы) [17, 21].

Изложенные выше сформулированные понятия позволят построить новую рационально-целевую модель, представляющую собой в сравнении существующую (стабильно-функционирующую) и развиваемую системы КБ.

**Решение задачи № 3**

Ресурсная база предприятия является мощным интегрирующим фактором во всех сферах деятельности, так как обеспечивает необходимым все процессы, выполнение которых планируется реализовать в ближайшей и в долгосрочной перспективе [18].

Соответственно возникает необходимость в разработке научно-методического аппарата (моделей, методов, методики и т.д.) [7], использование которого позволит перейти к новому, качественному состоянию функционирования системы КБ на предприятиях НГК России, максимальное приближение к такому состоянию возможно через синтез существующей системы КБ, имеющей стабильное (адаптивное) состояние. Сравнительная модель для существующей и развиваемой системы КБ на предприятии (рис. 4).

На основе анализа практики управления системой КБ на предприятиях НГК России, т.е. реализации ее задач управления с применением контрольно-надзорных функций, представлены (см. рис. 4) для сравнения два математических выражения (существующего и развиваемого), показанные в виде:

$$\left. \begin{aligned} S &\rightarrow S_{(1-N)} \sum_{i=1}^n M_{(OT)} [1-n] \\ S &\rightarrow S_{(1-N)} \sum_{i=1}^n M_{(OT)} [\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_n] \end{aligned} \right\} R = \text{const}, \quad (1)$$

где  $S$  — система КБ предприятия;  
 $S_{(1-N)}$  — подсистемы, входящие в содержание системы КБ предприятия;  
 $M_{(OT)} [1-n]$  — перечень организационно-технических мероприятий (в виде общего списка), требующих внесения корректирующих воздействий от органа управления;  
 $M_{(OT)} [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$  — перечень организационно-технических мероприятий (в виде ранжированного списка, имеющего индивидуальный весовой коэффициент влияния), требующих внесения корректирующих воздействий от органа управления.

Для представленной модели (см. рис. 4) установлен факт наличия ограничений в ресурсной обес-

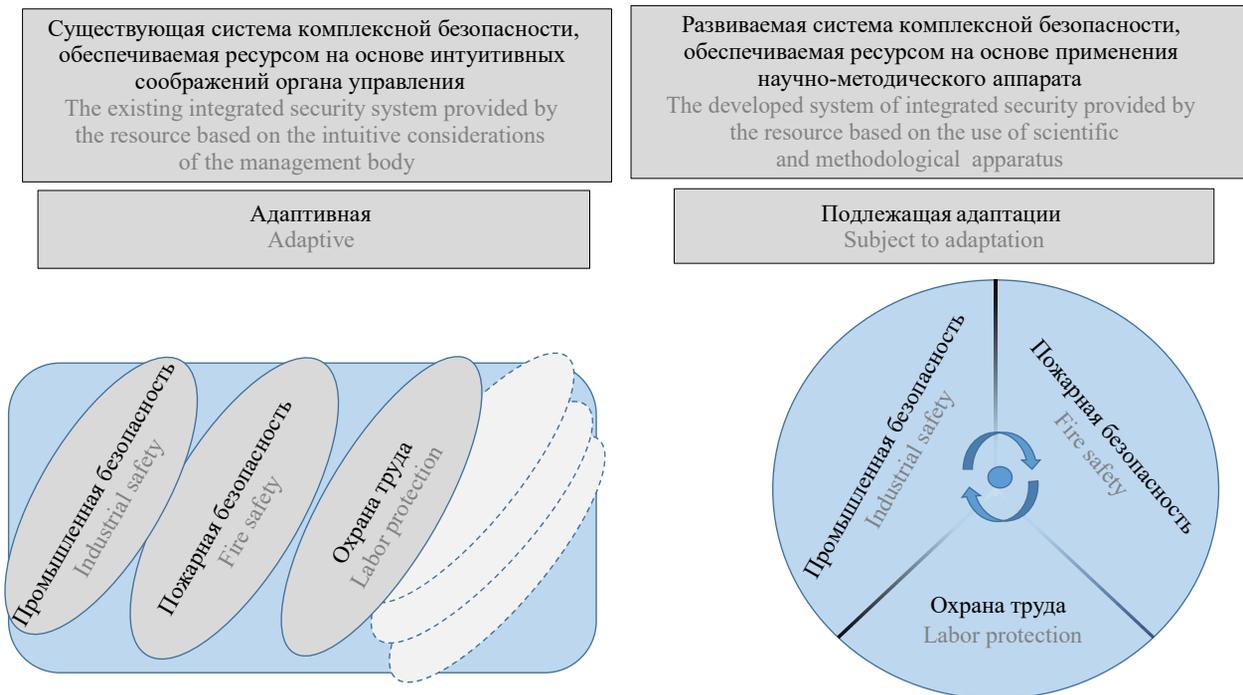


Рис. 4. Существующая и прогнозируемая система для разработки модели системы КБ предприятия

Fig. 4. Existing and forecasted models of an integrated corporate security system

печенности системы КБ, т.е. ограниченных возможностей предприятия в покрытии запроса на обеспечение ресурсом, запрашиваемым руководителями служб (отделов) — кураторов направлений (ПрБ и ПБ).

На показанном выражении (1), расположенном в нижней части, подтверждается необходимость в адаптации системы КБ к новым условиям ее развития, формируемым на основе соблюдения рациональности распределения ресурса, предназначенного подсистемам (ПрБ, ПБ, ОТ) [17].

**Решение задачи № 4**

Автором статьи проведен эксперимент, рассматривающий приоритет в выделении ресурса для объектов (элементов):

- с одной стороны, на основе интуитивных соображений руководителя структурного подразделения, уполномоченного распределять ресурс для обеспечения подсистем (ПрБ, ПБ, ОТ);
- с другой стороны, с использованием на практике разработанного автором научно-методического аппарата (моделей, методов, методики и т.д.).

На рис. 5 представлено соотношение показателя влияния  $Y(t_0)$  для условий стабильного функционирования системы КБ к показателю влияния  $Y(t_1)$ , позволяющему развивать систему КБ предприятий НГК России. Положительная динамика в снижении ущерба от аварий и пожаров на предприятиях НГК России будет напрямую зависеть от повышения общего показателя влияния на снижение ущербов

от аварий и пожаров  $Y(t_1)$ , что можно представить в виде выражения:

$$m\lambda_n = \sum_{i=1}^n [Q_j^{\min} + \dots + Q_j^{\max}] \approx 19, \quad (2)$$

где  $m\lambda_n$  — математическое ожидание общего показателя, влияющего на снижение ущерба от аварий и пожаров, рассчитываемого с использованием числовых значений, взятых из выборки;  $Q_j^{\min} + \dots + Q_j^{\max}$  — числовые значения с минимальными и максимальными показателями, взятыми из выборки.

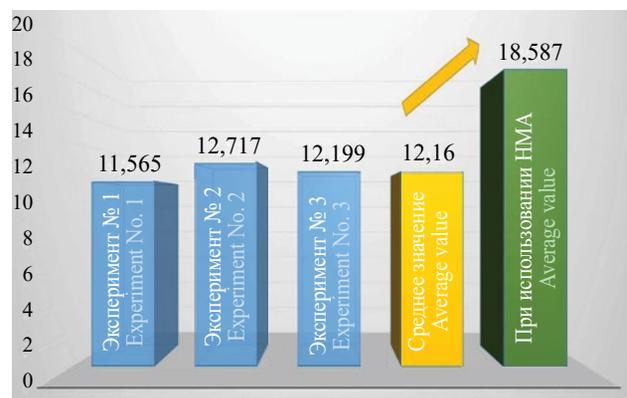


Рис. 5. График соотношений показателей существующей и развиваемой систем КБ на предприятиях НГК России

Fig. 5. The diagram showing the correlation between indicators of an existing integrated security system and the one that is being developed at the Russian OGI enterprises

В выражении (2) представлен общий рассчитанный показатель, влияющий на снижение ущербов от аварий и пожаров и имеющий непосредственное отношение к ущербам, указанным в отчетах об авариях и пожарах за период 2014–2020 гг. для предприятий НГК России (табл.).

Показатели ущербов (табл.) имеют непосредственное отношение к коэффициенту  $\lambda_n$ , который оказывает влияние на снижение ущерба от аварий и пожаров на предприятиях НГК России. При проведении несложной расчетной процедуры получен результат, позволяющий привязать социальные и экономические ущербы к условной единице коэффициента  $\lambda_n$ , непосредственно влияющего на снижение ущерба от аварий и пожаров на предприятиях НГК России (рис. 6). Наличие разных плановых периодов для развития системы КБ на предприятиях НГК России позволяет сформировать единый подход к распределению ресурсов, а также провести все согласования в самом начале этого длительного процесса.

В планах определяется временной горизонт для достижения стратегической цели, которая устанавливает временные рамки для достижения подцелей тактического и оперативного уровней [17]. На рис. 7 представлен пример временных горизонтов прогнозирования. Стратегическая цель устанавливается руководством на длительный срок, но путь к ее достижению должен быть поэтапным (помесячно, поквартально).

На тактическом уровне горизонт определения будущей деятельности ограничивается одним годом. Что касается распределения ресурсов для подсистем (ПрБ, ПБ, ОТ), входящих в систему КБ предприятия, то на данном временном интервале осуществляется

Общий ущерб, нанесенный авариями и пожарами на предприятиях НГК России в период 2014–2020 гг.

Total damage caused by accidents and fires at the Russian OGI enterprises in 2014–2020

| Категория<br>Category   | Ущерб<br>от аварий<br>Damage<br>caused by<br>accidents | Ущерб<br>от пожаров<br>Damage<br>caused by<br>fires | Общий<br>ущерб<br>Total<br>damage |
|---|--|---|-----------------------------------|
| Погибшие, чел.<br>Casualties,<br>persons                                  | 42   | 23  | 65                                |
| Пострадавшие,<br>чел.<br>Injured,<br>persons                              | 122  | 111   | 233                               |
| Экономический ущерб,<br>млн руб.<br>Economic<br>damage,<br>million rubles | 19 756,0   | 16 710,1  | 36 466,1                          |

согласование со всеми уполномоченными в распределении ресурса предприятия структурными подразделениями.

На оперативном уровне отрабатываются все действия, реализуемые в течение месяца (квартала), которые отображаются в документах целевого оперативного планирования.

В планах, разрабатываемых на основе временных горизонтов (рис. 5), отображаются: перечень проводимых мероприятий; ответственные исполнители; сроки исполнения; должностные лица, осуществляющие контроль, в отдельном же столбце разрабатываемого планирующего документа показан утверж-

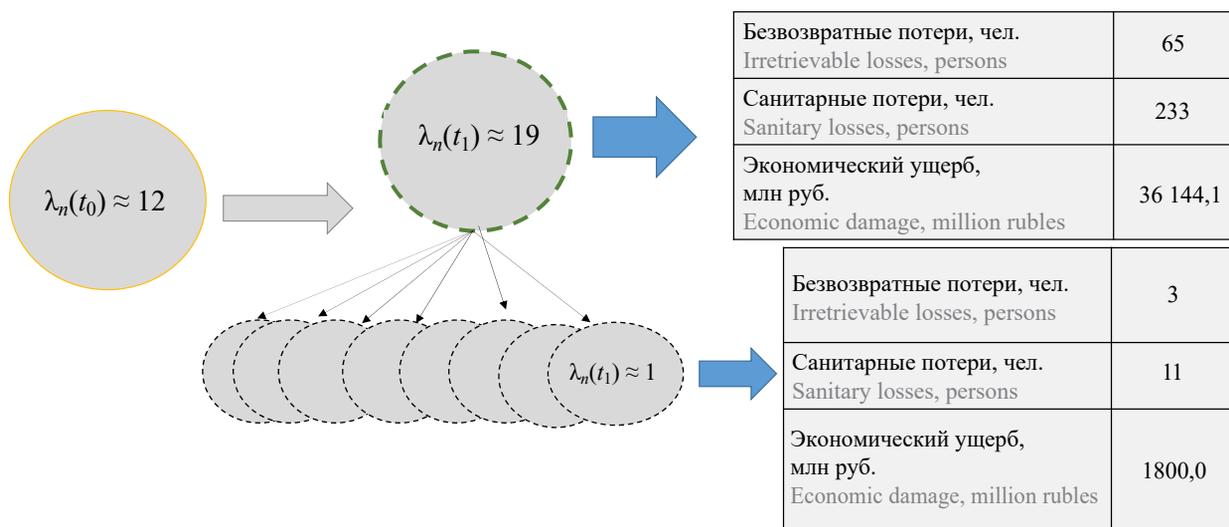


Рис. 6. Соотношение социально-экономических ущербов к показателю  $\lambda_n$ , равному одной условной единице

Fig. 6. The ratio of socio-economic damages to indicator  $\lambda_n$ , equal to one conventional unit

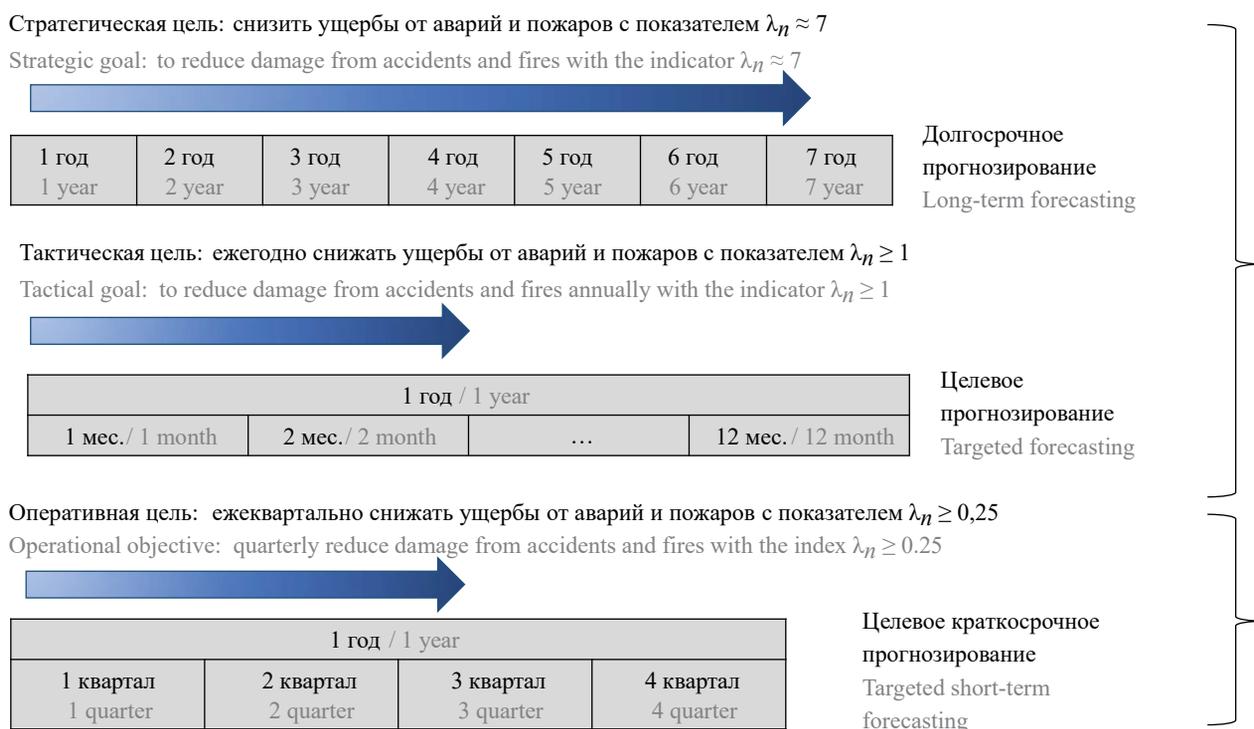


Рис. 7. Пример временных горизонтов развития системы КБ на предприятиях НГК России

Fig. 7. Time horizons for the development of an integrated security system at the Russian OGI enterprises

денный объем ресурсного обеспечения, выделяемого конкретной подсистеме (ПрБ, ПБ, ОТ), входящей в систему КБ предприятия.

### Выводы

1. Проанализирована статистика возникновения аварий и пожаров на предприятиях НГК России за период 2012–2020 гг., сделаны выводы о том, что на них около 20 % в год происходит совместных событий (аварий и пожаров) от общего числа аварий, ущерб наносится одновременно нескольким подсистемам (ПрБ, ПБ, ОТ), входящим в содержание КБ предприятий НГК России.

2. Сформулированы новые понятия для комплексной безопасности, системы комплексной безопасности, рационально-целевого развития системы комплексной безопасности на предприятиях НГК России.

3. Разработана новая рационально-целевая модель развития системы КБ на предприятиях НГК России, особенность которой заключается в сравнительном представлении существующей (стабильно-функционирующей) и развиваемой системы КБ.

4. Обосновано и продемонстрировано использование новой рационально-целевой модели развития системы КБ на предприятиях НГК России, а также представлен пример, доказывающий адекватность ее использования.

Применение разработанной рационально-целевой модели развития системы КБ на предприятиях НГК России позволяет на практике решать проблему по снижению ущерба от аварий и пожаров в рассматриваемой системе, т.е. решать проблему, имеющую важное социально-экономическое значение для России.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Резников Д.О., Дубинин Е.Ф. Анализ рисков и обеспечение защищенности критически важных объектов нефтегазохимического комплекса : учебное пособие. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 560 с.
- Gvozdev E. On the probability determination of the reliability of a technosphere object under hazardous influence // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052043. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052043
- Gvozdev E.B. Об оценке состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 49–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64
- Kryvenko G.M., Lialiuk-Viter G.D., Shyman-skiyi V.Ya. The issues of preventing occupa-

- tional injuries of workers in the oil and gas industry // *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2021. Issue 2 (79). Pp. 64–72. DOI: 10.31471/1993-9973-2021-2(79)-64-72
5. Homer J. A comprehensive approach to enterprise network security management : Ph.D Dissertation. 2009. 134 p.
  6. Dotsenko S., Illiashenko O., Kamenskyi S., Kharchenko V. Embedding an integrated security management system into Industry 4.0 enterprise management: Cybernetic approach // *Studies in Big Data*. 2021. Vol. 84. Pp. 279–296. DOI: 10.1007/978-3-030-65722-2\_17
  7. Долгов А.И. Подготовка и экспертиза диссертаций : монография. МО РФ, 1995.
  8. Гвоздев Е.В., Матвиенко Ю.Г. Комплексная оценка риска на предприятиях жизнеобеспечения, имеющих опасные производственные объекты // *Безопасность труда в промышленности*. 2019. № 10. С. 69–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78
  9. Qingsong X., Leiguang J., Xuedong L. Decision-making optimization of complex product design task change perturbation based on prospect theory // *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2020. Vol. 34 (1). DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2020.01.020
  10. Gvozdev E. Visualization and diagnostics of reliability of the object with changing the functioning conditions // *E3S Web of Conferences*. Moscow, 2021. Vol. 263. P. 02009. DOI: 10.1051/e3s-conf/202126302009
  11. Marquez-Tejon J., Jimenez-Partearroyo M., Benito-Osorio D. Security as a key contributor to organisational resilience: a bibliometric analysis of enterprise security risk management // *Security Journal*. 2022. Vol. 35. Issue 2. Pp. 600–627. DOI: 10.1057/s41284-021-00292-4
  12. D'yakonova I., Nikitina A., Sukhonos V., Zhuravka F. Methodological bases of estimating the efficiency of economic security management of the enterprises in the global environment // *Investment Management and Financial Innovations*. 2018. Vol. 15. Issue 2. Pp. 145–153. DOI: 10.21511/imfi.15(2).2018.13
  13. Petruzzi J., Loyear R. Improving organisational resilience through enterprise security risk management // *Journal of Business Continuity & Emergency Planning*. 2016. Vol. 10. Issue 1. Pp. 44–56.
  14. Акимов В.А., Диденко С.Л. Междисциплинарные исследования проблем комплексной безопасности: состояние и пути решения // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2019. № 6. С. 16–26. DOI: 10.36535/0869-4176-2019-06-2
  15. Barry A., Born G., Weszkalnys G. Logics of interdisciplinarity // *Economy and Society*. 2008. Vol. 37. Issue 1. Pp. 20–49. DOI: 10.1080/03085140701760841
  16. Locatelli B., Vallet A., Tassin J., Gautier D., Chamaret A., Sist P. Collective and individual interdisciplinarity in a sustainability research group: A social network analysis // *Sustainability Science*. 2021. Vol. 16. Issue 1. Pp. 37–52. DOI: 10.1007/s11625-020-00860-4
  17. Одинов Б.Е. Сбалансированно-целевое управление развитием предприятия: модели и технология: монография / под ред. А.Н. Романова. М. : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2017. 161 с.
  18. Одинов Б.Е. Управление равновесным развитием объектов на базе интеллектуальных информационных систем // *Информатизация образования и науки*. 2019. № 1 (41). С. 151–163.
  19. Дубинина Н.А., Усков В.В. Подходы к оценке сбалансированности развития предприятий // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика*. 2011. № 1. С. 164–172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16375150>
  20. Гвоздев Е.В., Матвиенко Ю.Г. К обеспечению комплексной безопасности предприятий, имеющих опасные производственные объекты // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2020. № 2. С. 72–81. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-02-9
  21. Brych V., Halys N. Resource approach to strategic management of tourism enterprises // *Innovative Economy*. 2020. Issue 1–2. Pp. 125–132. DOI: 10.37332/2309-1533.2020.1-2.18

## REFERENCES

1. Makhutov N.A., Permyakov V.N., Akhmetkhanov R.S., Reznikov D.O., Dubinin E.F. *Risk analysis and ensuring the security of critical facilities of the petrochemical complex : textbook*. Tyumen, TSOGU, 2013; 560. (rus).
2. Gvozdev E. On the probability determination of the reliability of a technosphere object under hazardous influence. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052043. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052043
3. Gvozdev E.V. The assessment of the integrated safety of Russian oil and gas enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):49-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64 (rus).
4. Kryvenko G.M., Lialiuk-Viter G.D., Shymkent V.Ya. The issues of preventing occupational injuries of workers in the oil and gas industry. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2021; 2(79):64-72. DOI: 10.31471/1993-9973-2021-2(79)-64-72
5. Homer J. *A comprehensive approach to enterprise network security management : Ph.D Dissertation*. 2009; 134.

6. Dotsenko S., Illiashenko O., Kamenskyi S., Kharchenko V. Embedding an integrated security management system into Industry 4.0 enterprise management: Cybernetic approach. *In Studies in Big Data*. 2021; 84:279-296. DOI: 10.1007/978-3-030-65722-2\_17
7. Dolgov A.I. *Preparation and examination of dissertations : monograph*. Ministry of Defense of the Russian Federation, 1995. (rus).
8. Gvozdev E.V., Matvienko Yu.G. Comprehensive risk assessment at the life support enterprises with hazardous production facilities. *Occupational Safety in Industry*. 2019; 10:69-78. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78 (rus).
9. Qingsong X., Leiguang J., Xuedong L. Decision-making optimization of complex product design task change perturbation based on prospect theory. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2020; 34(1). DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2020.01.020
10. Gvozdev E. Visualization and diagnostics of reliability of the object with changing the functioning conditions. *E3S Web of Conferences*. Moscow, 2021; 263:02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302009
11. Marquez-Tejon J., Jimenez-Partearroyo M., Benito-Osorio D. Security as a key contributor to organisational resilience: a bibliometric analysis of enterprise security risk management. *Security Journal*. 2022; 35(2):600-627. DOI: 10.1057/s41284-021-00292-4
12. D'yakonova I., Nikitina A., Sukhonos V., Zhuravka F. Methodological bases of estimating the efficiency of economic security management of the enterprises in the global environment. *Investment Management and Financial Innovations*. 2018; 15(2):145-153. DOI: 10.21511/imfi.15(2).2018.13
13. Petruzzi J., Loyear R. Improving organisational resilience through enterprise security risk management. *Journal of Business Continuity & Emergency Planning*. 2016; 10(1):44-56.
14. Akimov V.A., Didenko S.L. Interdisciplinary studies of problems of integrated safety and security: current situation and solutions. *Safety and Emergencies Problems*. 2019; 6:16-26. DOI: 10.36535/0869-4176-2019-06-2 (rus).
15. Barry A., Born G., Weszkalnys G. Logics of interdisciplinarity. *Economy and Society*. 2008; 37(1):20-49. DOI: 10.1080/03085140701760841
16. Locatelli B., Vallet A., Tassin J., Gautier D., Chamalet A., Sist P. Collective and individual interdisciplinarity in a sustainability research group: A social network analysis. *Sustainability Science*. 2021; 16(1):37-52. DOI: 10.1007/s11625-020-00860-4
17. Odintsov B.E. *Balanced-target management of enterprise development: models and technology : monograph*. A.N. Romanov (ed.). Moscow, University Textbook; INFRA-M Publ., 2017; 161. (rus).
18. Odintsovo B.E. Management equilibrium development of objects on the basis of intelligent information systems. *Informatization of Education and Science*. 2019; 1(41):151-163. (rus).
19. Dubinina N.A., Uskov V.V. Approaches to assessing the balance of enterprise development. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2011; 1:164-172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16375150> (rus).
20. Gvozdev E.V., Matvienko Yu.G. To ensure comprehensive safety of enterprises with hazardous production facilities. *Problems of Safety and Emergency Situations : scientific information collection*. 2020; 2:72-81. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-02-9 (rus).
21. Brych V., Halysh N. Resource approach to strategic management of tourism enterprises. *Innovative economy*. 2020; 1-2:125-132. DOI: 10.37332/2309-1533.2020.1-2.18

Поступила 26.10.2022, после доработки 11.11.2022;  
принята к публикации 21.11.2022

Received October 26, 2022; Received in revised form November 11, 2022;  
Accepted November 21, 2022

### Информация об авторе

**ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общей и прикладной физики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: [evgvozdev@mail.ru](mailto:evgvozdev@mail.ru)

### Information about the author

**Evgeniy V. GVOZDEV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: [evgvozdev@mail.ru](mailto:evgvozdev@mail.ru)

## Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко,  
Владимир Иванович Зыков, Тимур Игоревич Чистяков

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке используются, в качестве одного из способов защиты от теплового потока, вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Однако влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей в случае реального режима пожара не исследовано.

**Цели и задачи.** Целью статьи является экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке. При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

**Теоретические основы.** В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Поэтому процесс деструкции изоляции может случиться до начала вспучивания покрытия.

**Результаты и их обсуждение.** Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить постепенный нагрев кабеля с заданным шагом изменения температуры и измерять электрические характеристики кабеля. Получены зависимости удельного сопротивления, индуктивности и емкости распространенных электрических кабелей от температуры окружающего кабель воздуха. Обнаружено, что постепенный нагрев электрического проводника или кабеля приводит в конечном итоге к короткому замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Показано, что фазы и амплитуды входного электрического сигнала могут существенно изменяться до наступления короткого замыкания.

**Выводы.** В случае одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели в них происходит короткое замыкание в диапазоне температур, в котором еще не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

**Ключевые слова:** ток нагрузки; силовой кабель; сигнальный кабель; температурный режим; изоляция; терморазложение

**Для цитирования:** Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Чистяков Т.И. Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 56–67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67.

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

## Operability evaluation of electrical wires and cables subjected to simultaneous fire and current loadings

Sergey V. Puzach ✉, Olga S. Lebedchenko, Vladimir I. Zykov, Timur I. Chistyakov

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

## ABSTRACT

**Introduction.** Intumescent coatings are used as a means of protection from heat flows, and their mission is to preserve the operability of wires and cables under fire conditions coupled with simultaneous current loading. However, the effect of insulation destruction on the operability of cables has not been studied for the case of a real fire regime.

**Goals and objectives.** The purpose of the article is to evaluate the experimental operability of electrical wires and cables subjected to simultaneous effects of fire and current loadings.

To achieve this purpose, an experimental testing unit was applied to conduct the experimental testing of wires and cables manufactured by various producers. At the same time, the temperature effect of the heated environment on electrical parameters of wires and cables, such as resistivity, inductance and capacitance, was evaluated.

**Theoretical background.** In real fire conditions, dependence of indoor temperature, affecting the heating of cable insulation, differs essentially from the same dependencies in cases of various standard fire conditions. Therefore, the insulation destruction process may occur before the coating intumescence starts.

**Results and discussion.** An experimental testing unit has been developed. This unit allows for the gradual cable heating with a pre-set temperature measurement interval and cable electrical characteristics. Dependencies of resistivity, inductance and capacitance of standard electrical cables on the temperature of the air surrounding the cable are obtained. It's been discovered that the gradual heating of an electrical conductor or cable eventually leads to a short circuit between its conductive cores and further electric current transmission in electrical wires and cables. It is shown that phases and amplitudes of an input electrical signal can drastically change before the short circuit.

**Conclusions.** The simultaneous effect of fire and current loadings on standard electrical wires and cables causes a short circuit in the temperature range, in which no intumescence of flame retardant coatings is initiated on the insulation surface. Therefore, these coatings can ineffectively maintain the operability of electrical wires and cables.

**Keywords:** load current; power cable; signal cable; thermal behaviour; insulation; thermal decomposition

**For citation:** Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Zykov V.I., Chistyakov T.I. Operability evaluation of electrical wires and cables subjected to simultaneous fire and current loadings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):56-67. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

## Введение

Нарушение изоляции в электропроводах и кабелях, вызываемое повышением их температуры, перенапряжениями, старением изоляции и механическими повреждениями может привести к короткому замыканию [1–20]. Из-за этого за короткий промежуток времени выделяется большое количество тепла в проводниках, вследствие чего изоляция начинает гореть и возникает пожар, часто приводящий к большому материальному ущербу, травмированию или гибели людей. Поэтому в ПУЭ устанавливаются предельно длительно допустимые значения температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение равно 70 °С.

С начала 2021 г. из-за короткого замыкания электропроводки произошло около 800 пожаров.

Например, 7 мая 2022 г. в подмосковных Мытищах произошел пожар в двухэтажном здании сварочного цеха<sup>1</sup>. Площадь возгорания составила 225 м<sup>2</sup> (рис. 1). Причиной возгорания является КЗ в электросети.

Пожар в антенной части останкинской башни на отметке 450 м, произошедший 27 августа 2000 г., показал, что при перегрузке силовых кабелей (волноводов) начался их нагрев до температуры плавления

<sup>1</sup> Четыре человека погибли при пожаре в подмосковных Мытищах // Инфо 24. URL: <https://info24.ru/news/chetyre-cheloveka-pogibli-pri-pozhare-v-podmoskovnyh-mytishah.html>



**Рис. 1.** Пожар в здании сварочного цеха, вызванный коротким замыканием

**Fig. 1.** A fire in a welding shop building caused by a short circuit

ния полихлорвиниловой внешней изоляции кабеля до температуры более 200 °С, что привело к последующему короткому замыканию токопроводящих жил кабеля [17].

В соответствии со статьей 82 (п. 2)<sup>2</sup>, кабельные линии и электропроводка систем противопожарной защиты, средств обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны, систем обнаружения пожара, оповещения и управления

<sup>2</sup> ФЗ № 123. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. 156 с.

эвакуацией людей при пожаре, аварийного освещения на путях эвакуации, аварийной вентиляции и противодымной защиты, автоматического пожаротушения, внутреннего противопожарного водопровода, лифтов для транспортировки подразделений пожарной охраны в зданиях и сооружениях должны сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для выполнения их функций.

Именно для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке используются, в качестве одного из способов защиты от теплового потока, вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

В работе [3] представлены результаты теоретической оценки эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки. Показано, что процесс деструкции материала изоляции кабелей происходит до начала вспучивания огнезащитного покрытия (за исключением углеводородного режима пожара). Однако влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей не исследовано.

Изложенное выше говорит о недопустимости нагрева проводов и кабелей каналов до момента разрушения изоляции этих кабелей и последующего короткого замыкания токоведущих жил, что может привести, например, к невозможности дальнейшей передачи информации по каналам связи.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных и теоретических исследований воздействия пожара на сигнальные и силовые провода и кабели и изменение их электрических параметров при нагреве являются исключительно актуальными.

Целью статьи является экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке. При этом оценивалось влияние температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

## Стандартные испытания на работоспособность

Испытания электрических и оптических кабелей на сохранение ими работоспособности в условиях воздействия пламени проводятся в соответствии с Государственным стандартом Российской Федерации<sup>3</sup>.

Согласно Стандарту, происходит воздействие пламени температурой не менее 750 °С. При этой температуре происходит гарантированное вспучивание огнезащитного состава, нанесенного на поверхность кабеля. Однако при реальном пожаре температура газовой среды помещения может нарастать медленно. Как показано в работе [3], в этом случае может не произойти вспучивание состава, что приводит к терморазложению материала изоляции кабелей.

В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Поэтому начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия.

По этой причине необходима разработка экспериментальной установки, позволяющей плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха.

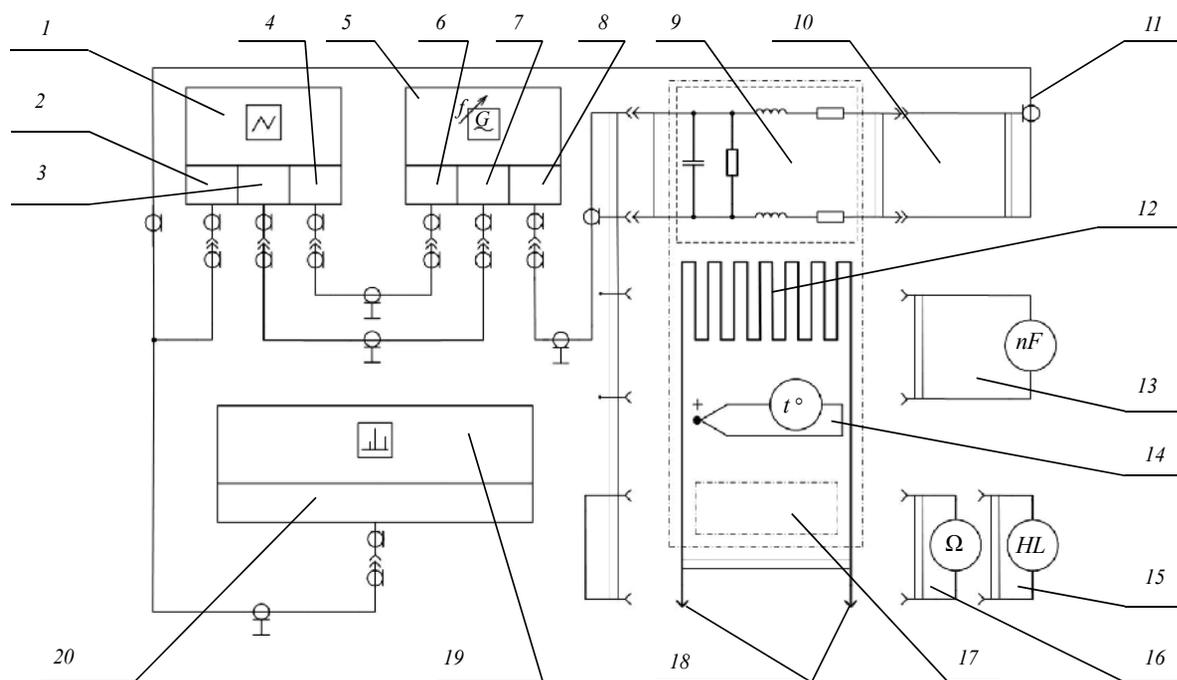
Кроме того, в стандартной установке изучается только возникновение короткого замыкания без измерения амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода, что является необходимым для оценки прохождения сигнала по сигнальным кабелям.

## Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для проведения натуральных испытаний был разработан экспериментальный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 2. Фотография стенда приведена на рис. 3.

Сигнал синусоидальной формы, амплитудой напряжения 2В и частотой  $2 \cdot 10^5$  Гц с одного из выходов (1) генератора (2) поступает в исследуемый образец кабеля или провода (3). На рис. 2 изображена эквивалентная схема испытуемого образца с распределенными по длине образца электрическими параметрами: емкостью, индуктивностью и сопротивлениями проводников и изоляции. На электрические параметры провода

<sup>3</sup>ГОСТ Р МЭК 60331–21–2003. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. Часть 21. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели на номинальное напряжение до 0,6/1,0 кВ включительно.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 — двухлучевой осциллограф; 2 — вход № 1 осциллографа; 3 — вход № 2 осциллографа; 4 — вход синхронизации осциллографа; 5 — генератор гармонического сигнала; 6 — вход синхронизации генератора гармонического сигнала; 7 — выход № 2 генератора гармонического сигнала; 8 — выход № 1 генератора гармонического сигнала; 9 — эквивалентная схема исследуемой кабельной линии; 10 — разъем наблюдения формы и спектра исследуемого сигнала; 11 — коаксиальная линия связи исследуемой кабельной линии и измерительных приборов; 12 — нагреватель муфельной печи; 13 — прибор измерения электрической емкости; 14 — измеритель температуры в нагревательной камере муфельной печи; 15 — прибор измерения электрической индуктивности; 16 — прибор измерения электрического сопротивления постоянному току; 17 — муфельная печь; 18 — электрическое питание муфельной печи со ступенчатым управлением мощностью нагрева; 19 — анализатор спектра гармоник исходного синусоидального сигнала; 20 — вход № 1 анализатора спектра

**Fig. 2.** Scheme of an experimental unit: 1 — double-beam oscilloscope; 2 — oscilloscope input 1; 3 — oscilloscope input 2 of; 4 — oscilloscope synchronization input; 5 — harmonic signal generator; 6 — synchronization input of harmonic signal generator; 7 — output 2 of harmonic signal generator; 8 — output 1 of harmonic signal generator; 9 — equivalent diagram of the cable line under investigation; 10 — connector for observing the shape and spectrum of the signal under investigation; 11 — coaxial communication line in the cable line under investigation and measuring instruments; 12 — muffle furnace heater; 13 — capacitance measuring device; 14 — temperature meter in the heating chamber of a muffle furnace; 15 — electrical inductance measuring device; 16 — direct current resistance measuring device; 17 — muffle furnace; 18 — electric power supply to the muffle furnace with a stepped control of the heating capacity; 19 — harmonic spectrum analyzer of the original sinusoidal signal; 20 — input 1 of the spectrum analyzer



**Рис. 3.** Общий вид стенда для проведения испытаний проводов и кабелей

**Fig. 3.** General view of a testing unit for wires and cables

оказывает воздействие тепловой поток и температура нагреваемой окружающей среды внутри муфельной печи (7).

Сигнал с выхода испытуемого образца поступает на один из входов (1) двухлучевого осциллографа (1). На второй вход (2) осциллографа поступает образцовый синусоидальный сигнал с выхода (1) генератора (2). Оба сигнала (изучаемый и образцовый) отображаются на экране двухлучевого осциллографа для их сравнения и визуального контроля изменений параметров амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода (рис. 4).

Для контроля уровня шума и спектра сигнала используется анализатор спектра (8), на вход (1) которого поступает сигнал с выхода испытуемого образца провода (рис. 5).



**Рис. 4.** Визуальный контроль формы сигнала на экране осциллографа: 1 — образцовый сигнал; 2 — сигнал с выхода испытываемого образца

**Fig. 4.** Visual control of the wave form on the oscilloscope screen: 1 — sample signal; 2 — signal generated by the tested specimen

Предположительно, воздействие тепловой энергии должно вызвать изменение формы, спектра и уровня шума гармонического сигнала при его прохождении через испытываемый образец провода, а также изменения емкости, индуктивности и сопротивления по длине испытываемого образца.

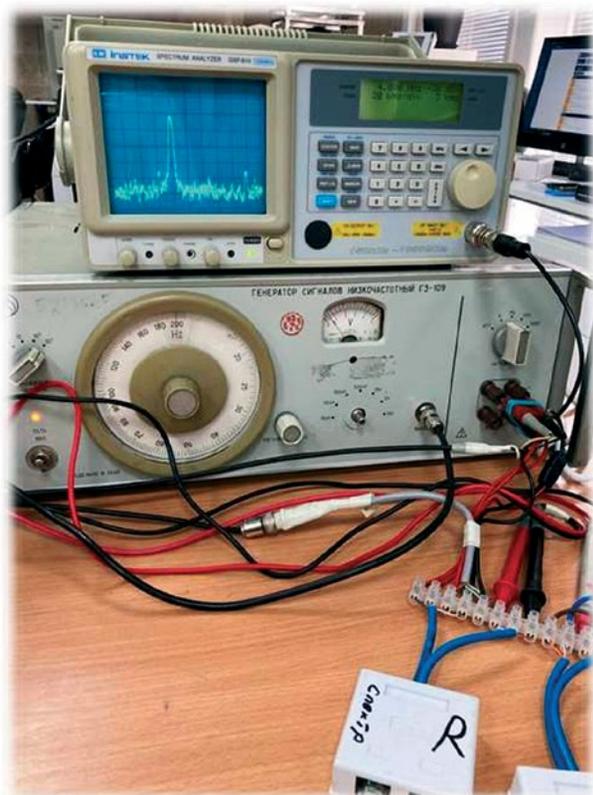
Температура в муфельной печи (7) изменяется программируемым контроллером с равными про-

межутками установившейся температуры, в момент которых происходят наблюдение и измерение электрических параметров сигнала. Установление температуры в печи необходимо для того, чтобы изоляция кабеля прогрелась до этой температуры.

В процессе визуального контроля формы и спектра сигнала, в момент стабилизации температуры в камере муфельной печи последовательно производится контроль емкости, индуктивности и сопротивления испытываемого образца. Для измерения величины электрической емкости образец провода левым (по схеме на рис. 2) концом подключается к разъему с пустыми контактами, а правым — к тестеру (4), включенному в режим измерения емкости (рис. 6).

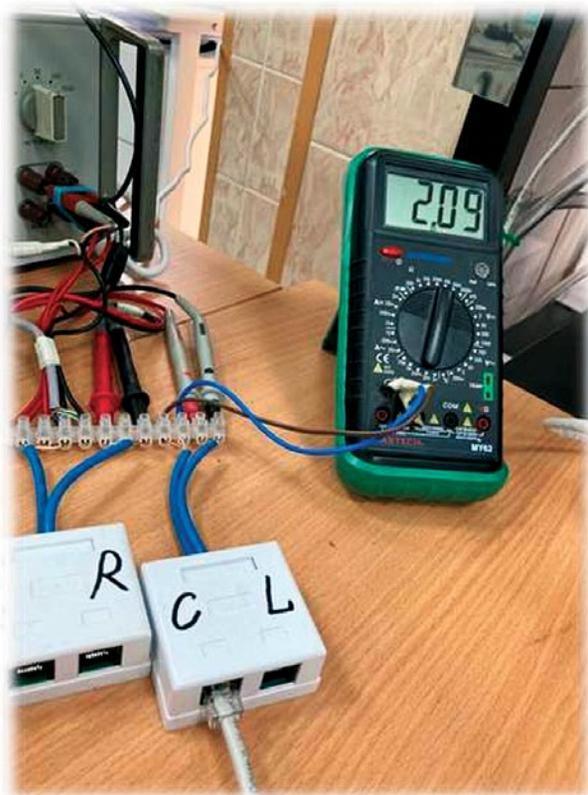
Для контроля величины электрической индуктивности испытываемый образец левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым — к тестеру (5), включенному в режим измерения индуктивности (рис. 7).

Для контроля величины электрического сопротивления образец провода левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым концом — к тестеру (6), включенному в режим измерения сопротивления (рис. 7).



**Рис. 5.** Визуальный контроль спектра сигнала на экране анализатора спектра

**Fig. 5.** Visual control of the signal spectrum on the spectrum analyzer screen



**Рис. 6.** Измерение электрической емкости испытываемого образца тестером

**Fig. 6.** Using the analyzer to measure the electrical capacitance of a tested specimen



**Рис. 7.** Измерение параметров индуктивности и сопротивления испытуемого образца с помощью тестера

**Fig. 7.** Using the analyzer to measure the inductance and resistance parameters of a tested specimen

### Исходные данные для проведения экспериментов

Проводились экспериментальные исследования следующих электрических проводов и кабелей:

- кабельная линия типа витая пара «hold-key e191267 ul cm 75 с utp 4pr 24awg etl verified cat5e tia/eia-568-b.2 0262ft (12/03)»<sup>4</sup>, используемая для прокладки внутри и вне помещений, в коробах, стенах, а также в телефонных сетях;
- кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2<sup>5</sup>, используемая для автоматического включения и выключения нагрузки при появлении движущихся объектов в зоне обнаружения датчика, включения освещения в помещении при открывании двери, автоматического открывания дверцы шкафа по движению ладони, включения сигнализации при открытии окна, контроля движения продукции на конвейере на производстве, контроля положения подвижных механизмов в пространстве (лифтовое и подъемное оборудование, ворота с автоматическими приводами) и др.;
- кабельная линия типа КМВЭВ 1×2×1,5<sup>6</sup> предназначена для применения в различных системах сигнализации и блокировки, в системах пожарной сигнализации, системах оповещения, связи, для

<sup>4</sup> Category 5 cable // Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Category\\_5\\_cable](https://en.wikipedia.org/wiki/Category_5_cable)

<sup>5</sup> Tdm Провод нагревательный ПНСВ 1×1,2 мм SQ0125-0001 // TDMelectric. URL: [http://www.tdm-rus.ru/goods/tdm\\_sq0125-0001.htm?frommarket=&ymlid=164914905402\\_70571\\_198500014](http://www.tdm-rus.ru/goods/tdm_sq0125-0001.htm?frommarket=&ymlid=164914905402_70571_198500014)

<sup>6</sup> Кабель КМВЭВ // Кабельные системы. URL: <https://kabel-s.ru/catalog/kmvev/kmvev-1x2x1-5/>

внутри- и межблочного монтажа различной аппаратуры и т.п. (с рабочим переменным напряжением не более 300 В и постоянным не более 420 В).

Свойства кабелей витой пары были следующими: материал проводников — медь; диаметр проводника 0,51 мм; толщина полиэтиленовой изоляции проводников 0,25 мм; толщина ПВХ изоляции кабеля 0,5 мм.

Кабели из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 имели следующие свойства: материал проводников — сталь; диаметр проводника 1,2 мм; изоляция: виниловый пластикат; толщина изоляции 0,3 мм.

Свойства кабеля типа КМВЭВ 1×2×1,5 были следующими: материал проводника — медь; диаметр проводника 1,5 мм; толщина изоляции проводника 0,35 мм; толщина изоляции кабеля 0,8 мм.

Для равномерности нагрева испытуемые образцы проводов и кабелей были свернуты в форме спирали (рис. 8).

При достижении температуры в пределах 149–190 °С для различных типов кабелей и проводов, испытываемых в данной работе, происходит разрушение изоляции испытуемого проводника и последующее короткое замыкание токопроводящих жил проводника. При этом передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

### Результаты экспериментов и их анализ

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры приведены в табл. 1, 2.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 при воздействии температуры представлены в табл. 3.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры показаны в табл. 4. Для исследования изменения спектра использован генератор синусоидального сигнала частотой 200 кГц.

Из табл. 1–4 видно, что при нагреве всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание произошло при температурах окружающей среды в диапазоне 149–190 °С.

При испытаниях витой пары (табл. 1 и 2) и кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 (табл. 4) изменения фазы и амплитуды входного сигнала не произошло.

В экспериментах с двухжильным нагревательным проводом типа ПНСВ 1×1,2 (табл. 3) при температуре 120 °С начался сдвиг фазы синусоидального сигнала, при 170 °С произошли скачки амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала, а при 180 °С установился стабильный



**Рис. 8.** Образцы кабелей и проводов и их размещение в муфельной печи: *a* — образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 после воздействия температуры в муфельной печи; *b* — образец кабеля типа витая пара в муфельной печи; *c* — образец провода типа КМВЭВ 1×2×1,5; *d* — образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2; *e* и *f* — образцы кабеля типа витая пара

**Fig. 8.** Specimens of cables and wires and their arrangement in a muffle furnace: *a* — a specimen of a two-core heating wire of 1×1.2 PNSV type after exposure to a temperature effect in a muffle furnace; *b* — a specimen of a “twisted pair” cable in a muffle furnace; *c* — a specimen of a wire of the KMVEV type 1×2×1.5; *d* — a specimen of a two-core heating wire of the PNSV type 1×1.2; *e* and *f* are specimens of the twisted pair type cable

**Таблица 1.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент № 1)

**Table 1.** Measured electrical parameters of a twisted pair cable line subjected to the temperature effect (Experiment 1)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{пФ}$<br>$C, \text{pF}$ | $L, \text{мГн}$<br>$L, \text{mH}$ | Примечания<br>Notes   |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 22                  | 9,2                           | 2,05                             | 0,026                             | Длина медного кабеля:<br>в нагреваемом образце 7,0 м;<br>в подводящей (холодной части) 4,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 88 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 44 м  |
| 60                  | 8,6                           | 1,26                             | 0,027                             |   |
| 80                  | 8,9                           | 1,2                              | 0,027                             |   |
| 100                 | 9,9                           | 1,2                              | 0,026                             | Length of copper cable:<br>in a heated specimen of 7.0 m;<br>in the feeding (cold) line of 4.0 m.<br>The total length of the wire when resistance and inductance were measured is 88 m.<br>The total length of a pair of wires, when capacitance and signal strength were measured, is 44 m |
| 149                 | 3,5                           | 0                                | 0,003                             | <b>Короткое замыкание проводников</b><br>Short-circuit of the conductors  |

**Таблица 2.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент № 2)

**Table 2.** Measured electrical parameters of a twisted pair cable line subjected to the temperature effect (Experiment 2)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{ Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{ пФ}$<br>$C, \text{ pF}$ | $L, \text{ мГн}$<br>$L, \text{ mH}$ | Примечания<br>Notes  |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 20                  | 8,9                            | 2,11                               | 0,028                               | Длина медного кабеля витая пара:<br>в нагреваемом образце 7,0 м;<br>в подводящей (холодной части) 4,5 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 92 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 46 м<br>Length of copper cable twisted pair:<br>in a heated sample of 7.0 m;<br>in the supply (cold part) 4.5 m.<br>The total length of the wire is 92 m at the time when resistance and inductance are measured.<br>The total length of a pair of wires is 46 m when capacitance and waveform are measured |
| 40                  | 9,2                            | 2,12                               | 0,028                               |  |
| 60                  | 9,5                            | 1,24                               | 0,028                               |  |
| 80                  | 10,0                           | 1,24                               | 0,028                               |  |
| 100                 | 10,0                           | 1,24                               | 0,028                               |  |
| 120                 | 10,1                           | 1,24                               | 0,028                               |  |
| 130                 | 10,6                           | 1,25                               | 0,028                               |  |
| 140                 | 10,9                           | 1,28                               | 0,028                               |  |
| 150                 | 10,9                           | 1,27                               | 0,027                               |  |
| <b>151</b>          | <b>4,4</b>                     | <b>0</b>                           | <b>0,005</b>                        |  |
| 170                 | 1,9                            | 0                                  | 0,003                               | –  |

**Таблица 3.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 при воздействии температуры

**Table 3.** Measured electrical parameters of a cable line made of a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type subjected to a temperature effect

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{ Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{ пФ}$<br>$C, \text{ pF}$ | $L, \text{ мГн}$<br>$L, \text{ mH}$ | Примечания<br>Notes   |  |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 20                  | 5,7                            | 0,398                              | 1,37                                | Длина кабеля со стальными проводами в нагреваемом образце 15,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 30,0 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 15,0 м<br>Length of cable with steel wires in a heated specimen, 15.0 m.<br>The total length of the wire when resistance and inductance are measured is 30.0 m.<br>The total length of a pair of wires when capacitance and waveform are measured is 15.0 m |  |
| 40                  | 7,1                            | 0,399                              | 1,38                                |   |  |
| 60                  | 6,3                            | 0,399                              | 1,39                                |   |  |
| 80                  | 6,8                            | 0,398                              | 1,39                                |   |  |
| 100                 | 6,9                            | 0,398                              | 1,40                                |   |  |
| 110                 | 7,3                            | 0,397                              | 1,40                                |   |  |
| <b>120</b>          | <b>7,4</b>                     | <b>0,397</b>                       | <b>1,41</b>                         |   | <b>Сдвиг фазы синусоидального сигнала</b><br><b>Phase shift of the sinusoidal signal</b> |
| 130                 | 7,7                            | 0,398                              | 1,42                                |   | –  |
| 140                 | 7,9                            | 0,398                              | 1,42                                |   | –  |
| 150                 | 8,1                            | 0,411                              | 1,43                                |   | –  |
| 160                 | 8,4                            | 0,410                              | 1,43                                | –   |  |
| <b>170</b>          | <b>8,9</b>                     | <b>0,440</b>                       | <b>1,44</b>                         | <b>Скачки амплитуды сигнала на спектрограмме</b><br><b>Signal amplitude jumps on the spectrogram</b>  |  |
| <b>180</b>          | <b>9,1</b>                     | <b>0,440</b>                       | <b>1,43</b>                         | <b>Стабильный характер изменения амплитуды сигнала на спектрограмме</b><br><b>Stable nature of a change in signal amplitude on the spectrogram</b>  |  |
| <b>190</b>          | <b>3,8</b>                     | <b>0,23</b>                        | <b>0,38</b>                         | <b>Короткое замыкание проводников</b><br><b>Short-circuit of conductors</b>   |  |
| 200                 | 1,8–4,6                        | 0,122                              | 0,07                                | –   |  |
| 220                 | 2,5                            | 0,26                               | 0,09                                | –   |  |
| 250                 | 2,4–3,0                        | 0,04                               | 0,05                                | –   |  |

**Таблица 4.** Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры**Table 4.** The results of measuring the electrical parameters of the cable line type KMVEV 1×2×1.5 when exposed to temperature

| $t, ^\circ\text{C}$ | $R, \text{ Ом}$<br>$R, \Omega$ | $C, \text{ пФ}$<br>$C, \text{ pF}$ | $L, \text{ мГн}$<br>$L, \text{ mH}$ | Примечания<br>Notes   |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 20                  | 1,4                            | 0,847                              | 0,007                               | Длина кабеля с медными проводами в нагреваемом образце 6,0 м.<br>Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 12,0 м.<br>Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 6,0 м<br>Cable length with copper wires in a heated specimen of 6.0 m.<br>The total wire length at the time when resistance and inductance are measured is 12.0 m.<br>The total length of a pair of wires when capacitance and waveform are measured is 6.0 m |
| 40                  | 1,4                            | 0,934                              | 0,007                               |   |
| 60                  | 1,4                            | 1,049                              | 0,007                               |   |
| 80                  | 1,4                            | 1,155                              | 0,007                               |   |
| 100                 | 1,4                            | 1,169                              | 0,007                               |   |
| 110                 | 1,4                            | 1,174                              | 0,007                               |   |
| 120                 | 1,4                            | 1,196                              | 0,007                               |   |
| 130                 | 1,4                            | 1,217                              | 0,007                               |   |
| 140                 | 1,4                            | 1,248                              | 0,007                               |   |
| 150                 | 1,4                            | 1,293                              | 0,007                               |   |
| 160                 | 1,4                            | 1,410                              | 0,007                               |   |
| 170                 | 1,4                            | 1,605                              | 0,007                               |   |
| 180                 | 1,4                            | 2,030                              | 0,007                               |   |
| <b>187</b>          | <b>1,0</b>                     | <b>0</b>                           | <b>0,017</b>                        |   |

характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме (рис. 9).

Полученные результаты проведенных экспериментальных испытаний проводов и кабелей различных типов показали, что постепенный нагрев электрического проводника или кабеля приводит к искажению передаваемой информации по сигнальным кабелям в связи со сдвигом фазы и изме-



**Рис. 9.** Визуальный контроль формы сигнала с двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 на экране осциллографа в момент стабилизации сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме: 1 — образцовый сигнал; 2 — сигнал с выхода испытуемого образца

**Fig. 9.** Visual control of the waveform emitted by a two-core heating wire of the PNCV 1×1.2 type on the oscilloscope screen at the moment of phase shift stabilization and signal amplitude change on the spectrogram: 1 — specimen signal; 2 — signal emitted by the tested specimen

нением амплитуды сигнала на спектрограмме и, в конечном итоге, к короткому замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Поэтому обработка кабелей огнезащитными вспучивающимися составами с температурой начала вспучивания в диапазоне 180–250 °С [3] может не сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке, так как в процессе нагрева не происходит вспучивание покрытий.

## Выводы

В случае одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание проводников в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

Таким образом, необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных режимов пожара.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Лебедченко О.С., Зыков В.И., Пузач С.В.* Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 4. С. 51–58. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.51-58
2. *Лебедченко О.С.* Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара // *Ройтмановские чтения : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. г. Москва, 5 марта 2020 г. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 72–75. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42880351*
3. *Лебедченко О.С., Пузач С.В., Зыков В.И.* Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2021. Т. 30. № 4. С. 36–47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47
4. *Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдушкиев О.Б.* Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 5. С. 75–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80
5. *Зыков В.И., Анисимов Ю.Н., Малашенков Г.Н.* Противопожарная защита электрических сетей от токов утечки // *Снижение риска гибели людей при пожарах : мат. XVIII науч.-практ. конф. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 2003. С. 182–185.*
6. *Смелков Г.И.* Пожарная безопасность электроустановок. М. : Кабель, 2009. 328 с.
7. *Мещанов Г.И., Холодный С.Д.* Анализ особенностей горения полимерной изоляции кабелей при их групповой прокладке // *Наука и техника*. 2010. № 5 (324). С.10-14.
8. International atomic energy agency, benchmark analysis for condition monitoring test techniques of aged low voltage cables in nuclear power plants; final results of a coordinated research project. IAEA-TEC-DOC1825. Vienna, 2017. 192 p.
9. NEA/CSNI/R(2018)8. Cable ageing in nuclear power plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) project. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. December 6, 2018. 58 p. URL: https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En
10. *Edvard Csanyi*. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources) // EEP — Electrical Engineering Portal. April 29, 2019. URL: https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations.
11. *Finger V*. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance // *Journal of electrical insulation EEE*. 1986. Vol. 2. No. 4. P. 128.
12. Cable Research in Light Water Reactor Related to Mechanisms of Cable Degradation: Understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations. US DOE/NRC/EPRI, 2013.
13. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. NP-T-3.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2012.
14. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 2013.
15. SAND 2015-1794. Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants: A Review of Research Efforts Relevant to Ageing Mechanisms and Condition Monitoring. 2015.
16. CNSC 13395-REP-00001. Ageing management of cable in nuclear generating stations. 2012.
17. *Пехотилов В.А., Болодьян И.А., Рябиков А.И., Грузинова О.И.* Пожар на останкинской телебашне в 2000 году. Хроника событий // *Пожарная безопасность/Fire Safety*. 2017. № 4. С. 108–112.
18. *Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony CH Cheng, WK Chow*. Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment // *Journal of Fire Sciences*. 2019. Vol. 37. Issue 4-6. Pp. 303–319. DOI: 10.1177/0734904119860410
19. *Hostikka S., Matala A*. Modelling the fire behaviour of electrical cables // SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on “Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations”. Toronto, 2007.
20. *Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C*. Fire performance of wire and cable: Reaction to fire tests — a critical review of the existing methods and of new concepts. NIST Technical Note 1291. 1991.

## REFERENCES

1. Lebedchenko O.S., Zыkov V.I., Puzach S.V. Assessment of operation of safety channel signal cables at nuclear power plants under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):51-58. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.51-58 (rus).
2. Lebedchenko O.S. Assessment of ensuring correct operation of nuclear power plant safety channel cables in fire conditions. *Roytman readings : Collection of Materials of the 8th Scientific and Practical Conference. Moscow, March 5, 2020*. Moscow, Academy

- my of GPS of EMERCOM of Russia, 2020; 72-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42880351> (rus).
3. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Zykov V.I. The application efficiency of intumescent coatings for power cables of safety systems of nuclear power plants under fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):36-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47 (rus).
  4. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Evaluation of the toxicity of flame retardant signal cables in case of fire in the industrial premises. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5: 75-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80 (rus).
  5. Zykov V.I., Anisimov Yu.N., Malashenkov G.N. Fire protection of electrical networks from leakage currents. *Reducing the Risk of Loss of Life in Fires : materials of the XVIII scientific-practical Conf. Part 1*. Moscow, VNIPO, 2003; 182-185. (rus).
  6. Smelkov G.I. *Fire safety of electrical installations*. Moscow, Cable Publ., 2009; 328. (rus).
  7. Meshchanov G.I., Kholodnyy S.D. Analysis of the burning characteristics of polymer insulation of cables during their group laying. *Science and Technology*. 2010; 5(324):10-14. (rus).
  8. *International atomic energy agency, benchmark analysis for condition monitoring test techniques of aged low voltage cables in nuclear power plants; final results of a coordinated research project*. IAEA-TECDOC1825. Vienna, 2017; 192.
  9. NEA/CSNI/R(2018)8. Cable ageing in nuclear power plants. Report on the first and second terms (2012–2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) project. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. December 6, 2018; 58. URL: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2018\)8&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2018)8&docLanguage=En)
  10. Csanyi E. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources). *EEP — Electrical Engineering Portal*. April 29, 2019. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>
  11. Finger V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance. *Journal of Electrical Insulation IEEE*. 1986; 2(4):128.
  12. Cable research in light water reactor related to mechanisms of cable degradation: understanding of role of material type, history, and environment, as well as accelerated testing limitations. US DOE/NRC/EPRI, 2013.
  13. Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants. NP-T-3.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2012.
  14. SAND 2013-2388. NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories, 2013.
  15. SAND 2015-1794. Submerged medium voltage cable systems at nuclear power plants: A review of research efforts relevant to ageing mechanisms and condition monitoring. March 2015.
  16. CNSC, 13395-REP-00001. Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations. September 2012.
  17. Pekhotikov V.A., Bolodyan I.A., Ryabikov A.I., Gruzina O.I. Fire on Ostankino TV tower in 2000. Chronicle of events. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2017; 4:108-112. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30775584>
  18. Xianjia Huang, Yuhong Wang, Wuyong Zeng, Lan Peng, Anthony CH Cheng, WK Chow. Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment. *Journal of Fire Sciences*. 2019; 37(4-6): 303-319. DOI: 10.1177/0734904119860410
  19. Hostikka S., Matala A. Modelling the fire behavior of electrical cables. *SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on "Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations"*. Toronto, August 2007.
  20. Babrauskas V., Peacock R.D., Braun E., Bukowski R.W., Jones W.C. *Fire performance of wire and cable: Reaction to fire tests – a critical review of the existing methods and of new concepts*. NIST Technical Note 1291. 1991.

Поступила 21.09.2022, после доработки 19.10.2022;  
принята к публикации 03.11.2022

Received September 21, 2022; Received in revised form October 19, 2022;

Accepted November 3, 2022

**Информация об авторах**

**ПУЗАЧ Сергей Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна**, канд. юр. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

**ЗЫКОВ Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

**ЧИСТЯКОВ Тимур Игоревич**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Пузач С.В.** — сбор материала, разработка методик и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

**Лебедченко О.С.** — идея, сбор материала, разработка методик и проведение эксперимента, получение, обработка и анализ экспериментальных данных, написание статьи.

**Зыков В.И.** — сбор материала, анализ экспериментальных данных, написание статьи, научное редактирование текста.

**Чистяков Т.И.** — разработка методик и проведение эксперимента; получение и обработка экспериментальных данных.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**Sergey V. PUZACH**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Olga S. LEBEDCHENKO**, Cand. Sci. (Legal), Associate Professor, Associate Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

**Vladimir I. ZYKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Professor of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1568-5167; e-mail: zykov01@mail.ru

**Timur I. CHISTYAKOV**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Sergey V. Puzach** — collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of article, scientific editing of text.

**Olga S. Lebedchenko** — idea, collection of material, development of methodology and experiment, acquisition, processing and analysis of experimental data, writing of an article.

**Vladimir I. Zykov** — collecting material, analyzing experimental data, writing an article, scientific editing of the text.

**Timur I. Chistyakov** — development of the procedure and conduct of the experiment; obtaining and processing experimental data.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ

Александр Павлович Парфененко ✉, Артем Борисович Тимофеев

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Целью статьи является теоретическое исследование влияния климатических условий регионов Российской Федерации на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа (СУГ) при непосредственном охвате пламени горения автомобиля на АЗС.

Задачи исследования:

- провести анализ нормативно-правовой базы в области пожарной безопасности по проектированию АЗС;
- провести анализ источников литературы отечественных и зарубежных авторов по проведенным экспериментальным исследованиям огневого воздействия пламени на резервуар СУГ;
- провести численное моделирование горения автомобиля в холодное и теплое время года с учетом наибольшей скорости ветра в РФ в холодный и теплый периоды времени года;
- провести численное моделирование в теплый период времени с целью определения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды региона России.

**Материалы и методы.** Используется метод математической статистики для обработки максимальных значений температуры и скорости ветра окружающей среды для каждого региона России, а также получения эмпирических значений скорости ветра и температуры окружающей среды регионов России. Методом математического моделирования пожара проведены расчеты в теплый период времени года с целью определения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды регионов России.

**Результаты.** Установлена зависимость между скоростью ветра и температурой окружающей среды регионов России, а также зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России.

**Выводы.** Полученные результаты исследований позволяют разработать мероприятия в части проектирования противопожарных расстояний между площадкой для автоцистерны топливозаправщика (парковки автомобиля перед его заправкой СУГ), резервуаром СУГ, газозаправочной колонки СУГ.

**Ключевые слова:** автомобильная заправочная станция; сжиженный углеводородный газ; противопожарные расстояния; скорость ветра; температура окружающей среды; безопасность людей

**Для цитирования:** Парфененко А.П., Тимофеев А.Б. Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 68–77. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.68-77

✉ Парфененко Александр Павлович, e-mail: parf01@inbox.ru

## A study on the influence of climatic conditions on the heating of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank

Aleksander P. Parfenenko ✉, Artem B. Timofeev

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The article contains a theoretical study on the influence of climatic conditions in various regions of the Russian Federation on the heating of a side wall of a liquified hydrocarbon gas (LHG) tank if the fire runs through the whole vehicle, located at a gas station.

Objectives of the study:

- analysis of the fire safety legislative framework applicable to gas station design;
- analysis of sources of domestic and foreign experimental studies on the fire impact of flames on an LHG tank;
- numerical simulation of the vehicle combustion in cold and warm seasons, taking into account the highest wind velocity in the Russian Federation;

- numerical simulations, conducted for a warm season to identify the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank, and the design wind velocity corresponding to the air temperature in a Russian region.

**Materials and methods.** The method of mathematical statistics is used to process maximum values of the air temperature and wind velocity for each Russian region and obtain the empirical values of the wind velocity and air temperature in the Russian regions. Calculations were made using the method of mathematical modelling of fire in warm periods to identify the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank and the design wind velocity corresponding to the air temperature in the regions of Russia.

**Results.** A dependence between the wind velocity and the air temperature in the Russian regions, as well as a dependence between the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank and climatic conditions of the Russian regions was identified.

**Conclusions.** The results, obtained by the researches, can be used to design the fire separation distance between the site designated for a fuel tanker truck (the parking lot for a vehicle before its fueling), an LHG tank and a gas station.

**Keywords:** vehicle fueling station; liquefied hydrocarbon gas; fire separation distance; wind velocity; air temperature; human safety

**For citation:** Parfenenko A.P., Timofeev A.B. A study on the influence of climatic conditions on the heating of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):68-77. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.68-77 (rus).

✉ Aleksander Pavlovich Parfenenko, e-mail: parf01@inbox.ru

## Введение

Нефтегазовая отрасль в Российской Федерации имеет ключевое значение для улучшения жизни человека. Потребление энергии с каждым годом увеличивается, и переход от традиционных видов топлив к альтернативным (сжиженный углеводородный и природный газ) имеет стратегическое значение [1], что способствует совершенствованию нормативно-правовой базы в области проектирования и эксплуатации автомобильных заправочных станций (АЗС), в том числе транспорта, работающего на газобаллонном оборудовании [2]. Современная нормативная база в области пожарной безопасности по проектированию АЗС в части противопожарных расстояний [3, 4] предъявляет высокие требования к размещению технологического оборудования, зданий и сооружений на противопожарных расстояниях как на самой территории АЗС, так и за ее пределами. Однако производители технологического оборудования для АЗС предлагают, в частности, автомобильную газозаправочную станцию (АГЗС) в модульном исполнении, а именно устройство на единой металлической раме газозаправочной колонки (ГЗК), насосного агрегата перекачки жидкой фазы СУГ, трубопроводной обвязки и модуля (резервуара) СУГ. При этом требование пожарной безопасности при проектировании модульной АГЗС отсутствует и проведение огневых исследований непосредственного воздействия пламени при горении автомобиля на стенки резервуара СУГ является актуальной темой.

Обеспечение пожарной безопасности АГЗС, анализ пожарной опасности опасных производственных объектов, транспорта с СУГ и оценка последствий при проектных аварийных ситуациях на объектах с СУГ рассмотрены авторами [5–7], что позволяет сделать вывод о существенном ущербе

как материальном, так и причинении вреда жизни и здоровью потребителей топлива, разработаны мероприятия по снижению рисков возникновения проектных аварий на АЗС.

Отечественными авторами [8–11] проведены исследования поведения в очаге пламени цистерн, баллонов и резервуаров СУГ, по результатам работ разработаны средства защиты указанных объектов и усовершенствованы способы противопожарной защиты с учетом комплекса технических мероприятий, обеспечивающих их пожарную безопасность (применение поверхностной и конструктивной огнезащиты, совершенствование устройства предохранительных клапанов на емкостном оборудовании СУГ).

Зарубежными авторами [12] получены результаты трех огневых испытаний (резервуар СУГ, охваченный пламенем горения дизеля) с незащищенными резервуарами для хранения СУГ объемом 4,85 м<sup>3</sup> и двух огневых испытаний с резервуарами СУГ того же типа, которые были оснащены тепловой изоляцией. В испытании № 2 (незащищенный резервуар СУГ) избыточное давление разрыва было самым высоким (3,9 МПа), время до разрыва стенок емкости было самым низким 7 мин 20 с, в момент взрыва резервуара СУГ температура жидкой фазы СУГ составляла 84–87 °С, температура внешней стенки резервуара (300 °С в положении парового пространства 45 и 420 °С в верхней его части), тепловой поток приблизительно 47 кВт/м<sup>2</sup>. Экспериментами установлено, что конструктивная огнезащита (теплоизоляция) способна предотвратить разрыв стенок СУГ при полном охвате огнем резервуара СУГ в течение 90 мин.

Авторами [13] по результатам экспериментальных исследований установлено, что система водяного пожаротушения резервуара СУГ, охваченного пламенем, с интенсивностью 400 л/(м<sup>2</sup>·ч), оснащен-

ного сбросным клапаном СУГ, предотвращает разрушение стенок резервуара СУГ в течение 90 мин огневого воздействия.

Экспериментальные исследования [14] показали, что применение поверхностной огнезащиты резервуара СУГ, покрытого тонким сублимационным вспучивающимся покрытием (CARTEK III) толщиной 8,8 мм, обеспечивает целостность стенок резервуара в течение 100 мин.

В работе [15] авторами проведены огневые испытания с резервуаром СУГ объемом 2300 л на расстояниях от 1,5 до 3,8 м от огневого воздействия пламени, представленного в виде факелов (огненной стены), состоящих из труб диаметрами 50 мм с отверстиями 2 мм, в качестве горючего использован природный газ. Результаты показали, что на поверхностях резервуара СУГ падающий тепловой поток составляет в диапазоне от 24 до 43 кВт/м<sup>2</sup>, максимальная поверхностная температура боковой стенки резервуара варьировалась от 294 до 386 °С, вследствие чего предохранительный клапан вышел из строя и образовалось струйное горение факела СУГ. Разрушения стенок резервуара не произошло. Даны рекомендации по изготовлению предохранительных клапанов с высокой температурой плавления, для предотвращения образования струйного истечения СУГ.

На полигоне Спейд Адам были проведены испытания [16] огневого воздействия теплового потока, соответствующего лесному пожару размерами: длиной 100 м и высотой 40 м на стенки резервуара СУГ. Результаты показали, что безопасное расстояние составляет 30 м между лесным пожаром и резервуаром СУГ, при этом температура стенок резервуара СУГ не превысила 427 °С, тепловой поток составил не более 26 кВт/м<sup>2</sup>, что обеспечивает безопасную эксплуатацию резервуара СУГ. По полученным исходным данным (критической температуры и давления резервуара) разработана 2D CFD-модель и подтверждена ее адекватность на соответствие имеющимся экспериментальным данным, что позволяет разрабатывать мероприятия по безопасной эксплуатации и проектированию резервуаров СУГ вблизи лесопарков [17]. Разработанная авторами [18] методология позволяет обеспечить подход к определению безопасных расстояний между лесными насаждениями и резервуарами СУГ при проектировании генеральных планов опасных производственных объектов.

Моделирование поведения резервуара СУГ, охваченного пламенем, рассмотрено в работах [19, 20], предложенные подходы позволяют оценить крупномасштабные аварии резервуаров СУГ (эффект «домино») с целью разработки мероприятий по безопасной эксплуатации и проектированию нефтегазовых объектов.

В работе [21] автором проведены огневые испытания поведения 5-тонного резервуара СУГ с заполнением от 22 до 72 % продолжительностью от 12 до 30 мин, охваченного пожаром пролива керосина. Максимальные поверхностные температуры стенок резервуара варьировались от 570 до 660 °С. С повышением давления в резервуаре через 5–7 мин после начала пожара срабатывал предохранительный клапан и воспламенялись пары СУГ с последующим струйным горением газа. Цель работы заключалась в получении данных тепловых потоков, поверхностных температур стенки резервуара, давления и температуры СУГ, а также рабочих характеристик предохранительных клапанов для разработки математических моделей.

Проведенный анализ экспериментальных исследований огневого воздействия пламени на резервуар СУГ отечественных и зарубежных авторов показал, что исследования в системе «горение автомобиля – расстояние – резервуар СУГ – климатические условия региона» не проводились. В результате чего необходимо провести численное моделирование воздействия пламени при горении автомобиля на боковую стенку резервуара СУГ с учетом климатических условий регионов России.

## Материалы и методы

Определение критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды регионов России проводится методом математического моделирования пожара. Полевой метод математического моделирования пожара выражается основными уравнениями закона сохранения массы, импульса и энергии [22].

Методами математической статистики [23]:

- определяется количество интервалов вариационных рядов значений скорости ветра от максимальной температуры окружающей среды в России;
- строится гистограмма распределения температуры окружающей среды и скорости ветра;
- устанавливается зависимость между скоростью ветра и температурой окружающей среды;
- устанавливается зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России.

## Результаты исследования

Для установления зависимости наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России предварительно проведено численное моделирование для выявления, в какой период

времени года проводить теоретическое и экспериментальное исследование. Результаты численного эксперимента по оценке влияния горения автомобиля на температуру внешней стенки резервуара СУГ для Камчатского края проведены на рис. 1–4.

Проведенное численное моделирование показало, что наименьшее время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при горении автомобиля с учетом ветровой нагрузки наступает в теплый период времени года. Поэтому дальнейшие исследования необ-

ходимо проводить в теплый период времени года как наиболее опасный сценарий аварии на АЗС.

Разброс максимальных значений температуры и скорости ветра окружающей среды на территории РФ с привязкой к региону приведен на рис. 5 (данные берутся из СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99\* Строительная климатология»).

Разброс данных, представленных на рис. 5, позволяет с использованием методов математической статистики провести ранжирование значений скорости ветра от максимальной температуры



Рис. 1. Зависимость температуры окружающей среды в холодный период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 1. Dependence between the air temperature in a cold season and the wind velocity for the Kamchatka Region

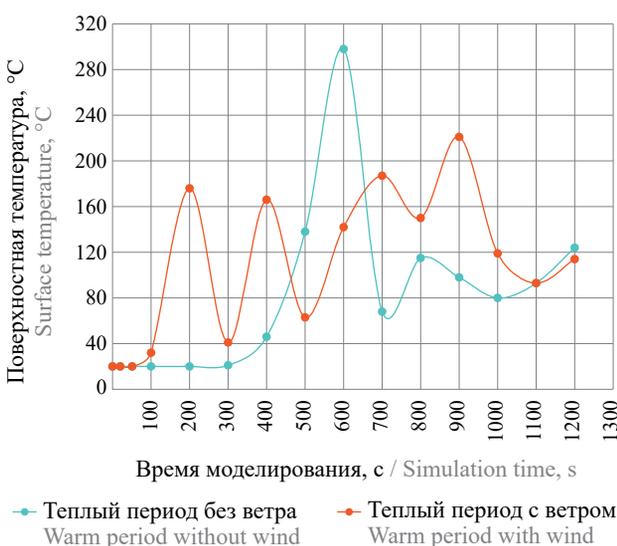


Рис. 2. Зависимость температуры окружающей среды в теплый период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 2. Dependence between the air temperature in a warm season and the wind velocity for Kamchatka Region

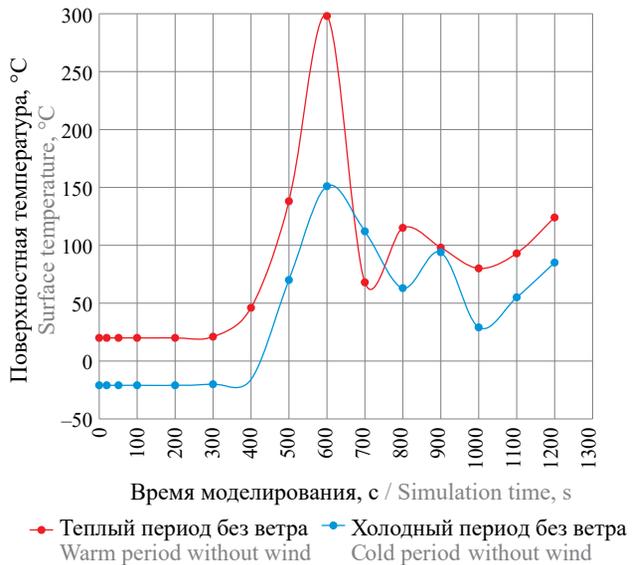


Рис. 3. Зависимость температуры окружающей среды в холодный период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 3. Dependence between the air temperature in a cold season and the wind velocity for the Kamchatka Region

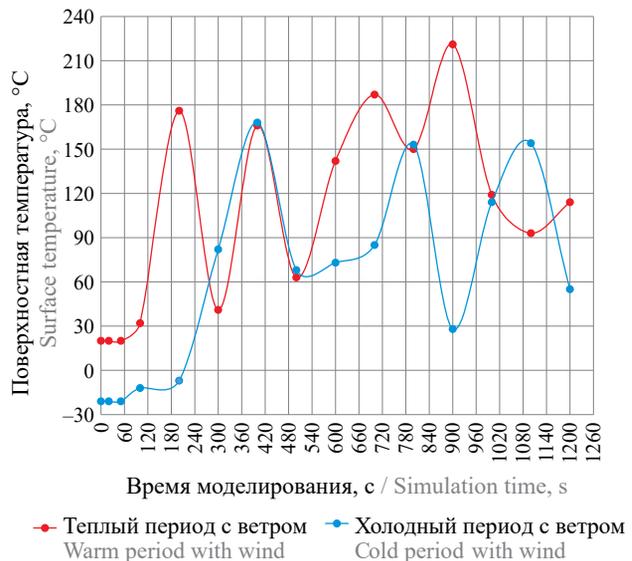


Рис. 4. Зависимость температуры окружающей среды в теплый период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 4. Dependence between the air temperature in a warm season and the wind velocity for the Kamchatka Region

окружающей среды и определить число интервалов вариационного ряда при диапазоне минимальных и максимальных значений, объединив при этом однородные климатические показатели регионов в одну выборочную совокупность. Гистограмма распределения температуры окружающей среды и скорости ветра, построенная с помощью программного комплекса SPSS Statistics, приведена на рис. 6.

Для каждого интервала были определены средние эмпирические значения скорости ветра и температуры окружающей среды и построен график, представленный на рис. 7.

Полученные эмпирические данные были аппроксимированы логарифмической кривой для установления теоретической зависимости скорости ветра от температуры окружающей среды, рис. 8.

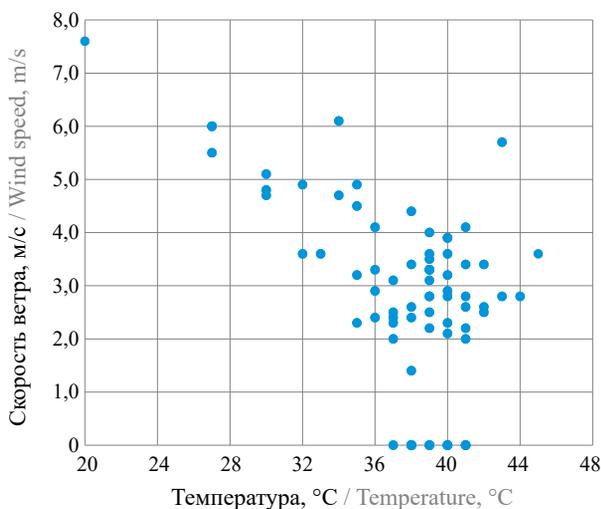


Рис. 5. Разброс значений скорости ветра от максимальной температуры окружающей среды в России

Fig. 5. The spread of wind velocity values depending on the maximum air temperature in Russia

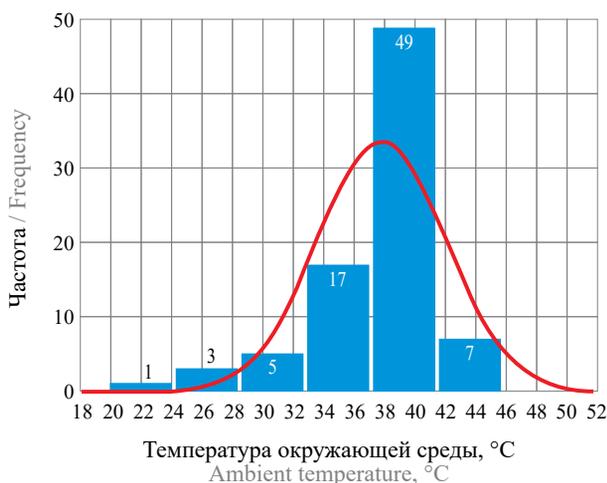


Рис. 6. Гистограмма распределения температуры окружающей среды при скорости ветра

Fig. 6. Histogram showing the dependence between the air temperature and the wind velocity

Полученная логарифмическая теоретическая зависимость с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,996$  позволила описать влияние двух климатических факторов (скорость ветра и температура окружающей среды в определенном регионе России) на расчетную скорость ветра. Зависимость представлена в виде формулы:

$$V_p = V_{\max}^{T.п} \cdot \left( 1 - 1,13 \ln \left( \frac{T_{o.ср}^{T.п}}{T_{\min}^{T.п} + 2} \right) \right), \quad (1)$$

где  $V_p$  — расчетная скорость ветра, м/с;

$V_{\max}^{T.п}$  — максимальная скорость ветра в регионе, м/с;

$T_{o.ср}^{T.п}$  — температура окружающей среды в регионе, °C;

$T_{\min}^{T.п}$  — минимальная температура в регионе, °C.

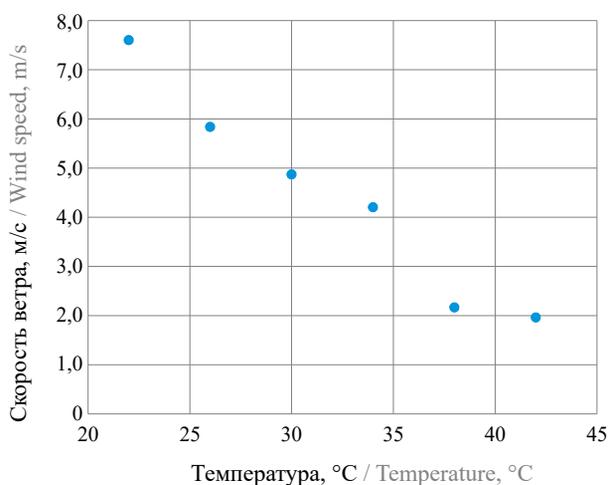


Рис. 7. График эмпирических значений скорости ветра от температуры окружающей среды

Fig. 7. The graph of empirical wind velocity values relative to the air temperature

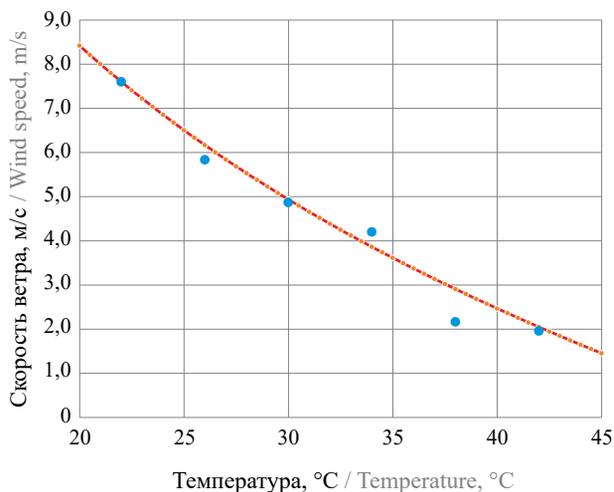
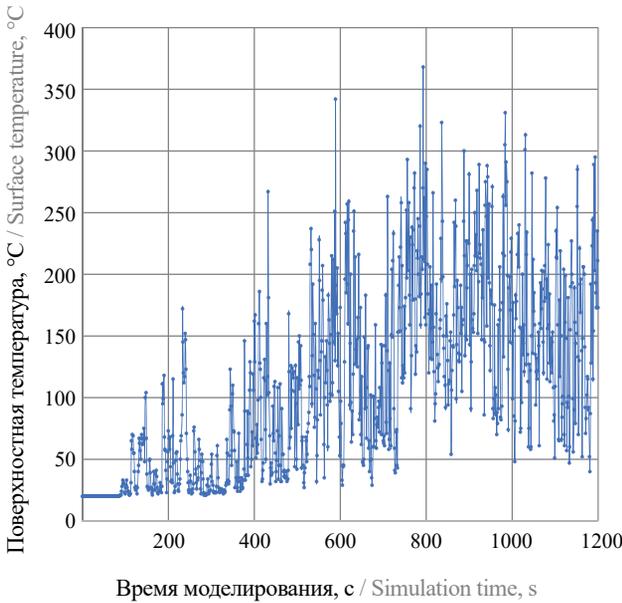


Рис. 8. Теоретическая зависимость скорости ветра от температуры окружающей среды

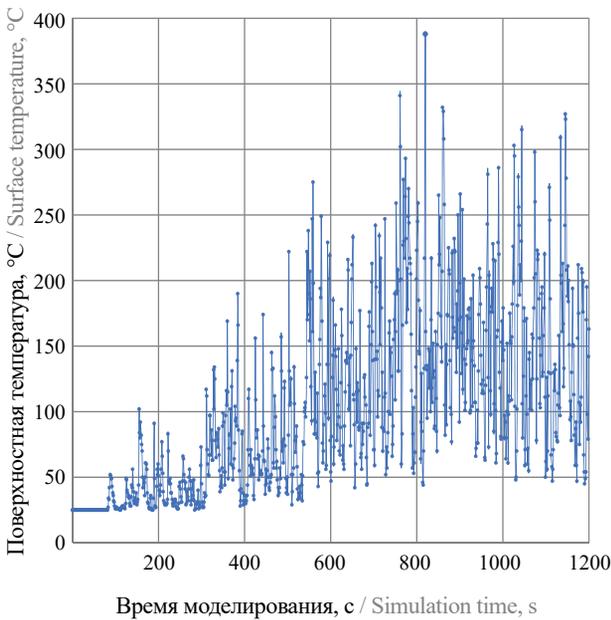
Fig. 8. Theoretical dependence between the wind velocity and the air temperature

Установленная зависимость была использована при проведении численного эксперимента горения автомобиля в теплый период года с целью определения времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при температуре окружающей среды 20, 25, 30, 35, 40 и 45 °С. Результаты численного эксперимента представлены на рис. 9–14.



**Рис. 9.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 20 °С

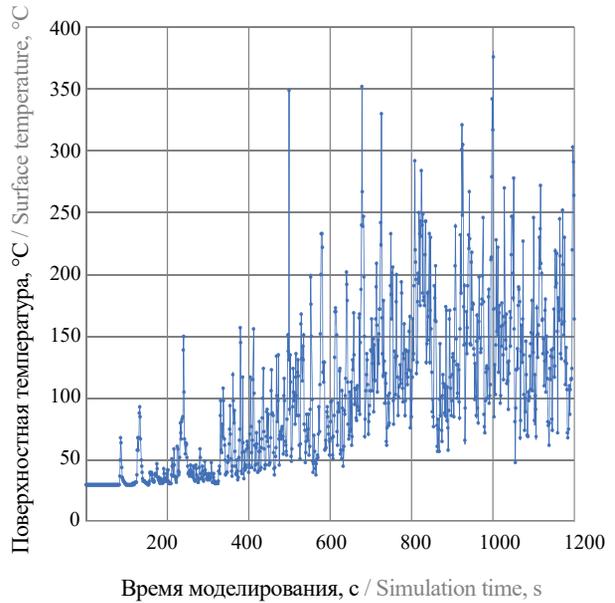
**Fig. 9.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 20 °С



**Рис. 10.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 25 °С

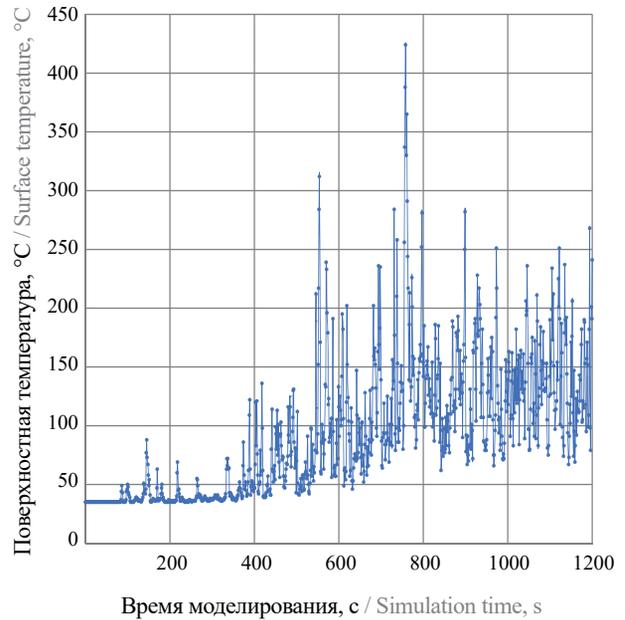
**Fig. 10.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 25 °С

Результаты численного моделирования позволили установить значения времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ в зависимости от расчетной температуры окружающей среды для установленных ранее температурных интервалов (рис. 6, 7). Полученные значения были аппроксимированы полиномом 3-й степени. Теоретическая зависимость представлена на рис. 15.



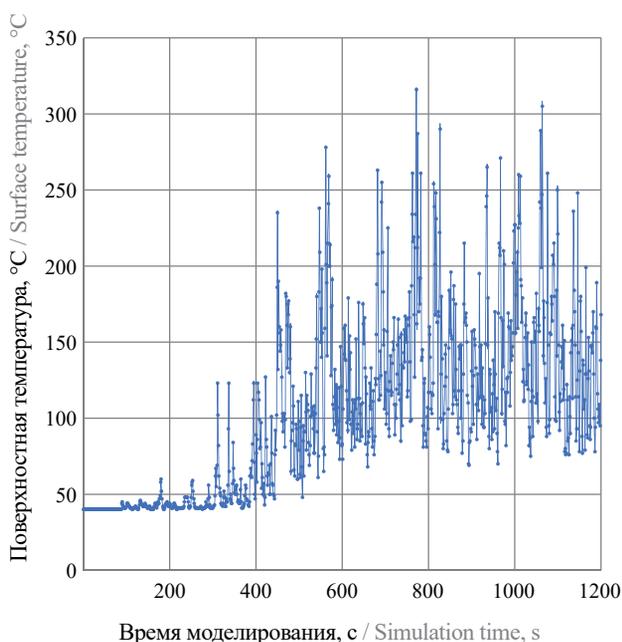
**Рис. 11.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 30 °С

**Fig. 11.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of temperature 30 °С



**Рис. 12.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 35 °С

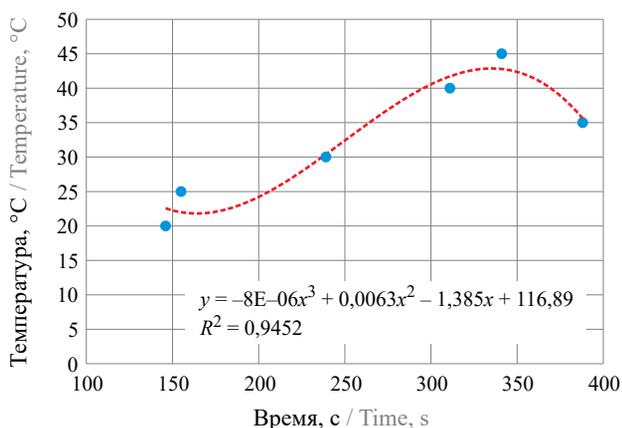
**Fig. 12.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 35 °С



**Рис. 13.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 40 °С

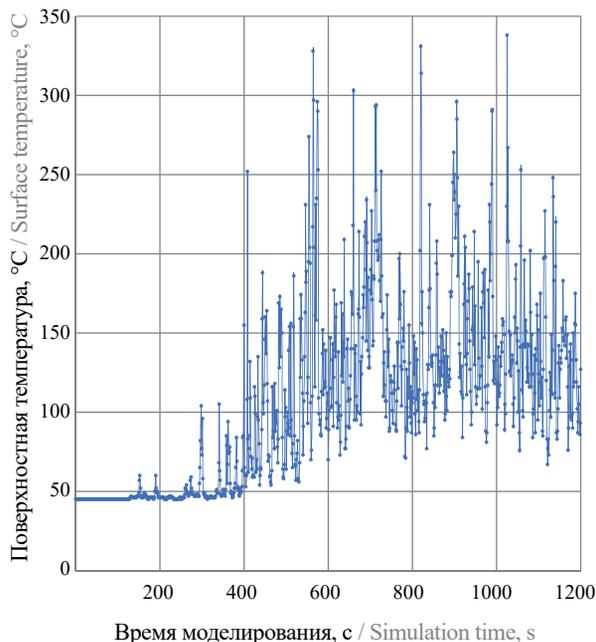
**Fig. 13.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 40 °C

Из графика рис. 15 видно, что при расчетной температуре окружающей среды 20 и 25 °С время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ наступает примерно через 150 с, при температуре окружающей среды 30 °С — через 245 с, при температуре окружающей среды 35–45 °С время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ наступает примерно в интервале от 300 до 400 с. Быстрое наступле-



**Рис. 15.** Зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России

**Fig. 15.** Dependence between the onset of critical surface temperature of a side wall of an LPG tank and the climatic conditions of Russian regions



**Рис. 14.** Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 45 °С

**Fig. 14.** Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 45 °C

ние времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при температуре окружающей среды 20 и 25 °С объясняется высокими показателями ветровых нагрузок в рассматриваемом интервале температур.

## Выводы

Проведенные теоретические исследования показали, что критическая поверхностная температура боковой стенки резервуара СУГ наступает быстрее в теплый период времени года с учетом боковой ветровой нагрузки.

Установленная зависимость (1), описывающая два фактора (скорость ветра и температуру окружающей среды в определенном регионе России), позволит учитывать расчетную скорость ветра, влияющую на прогрев боковой стенки резервуара СУГ до наступления критической поверхностной температуры.

Установленная зависимость (рис. 15) наступления критической поверхностной температуры от температуры окружающей среды показывает, что при определении противопожарных расстояний при проектировании АЗС необходимо учитывать климатические условия региона.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Николайчук Л.А., Дьяконова В.Д.* Современное состояние и перспективы развития рынка газомоторного топлива в России // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 65. DOI: 10.15862/106EVN216
2. *Певнев Н.Г., Раенбагина Э.Р.* Совершенствование нормативной базы по производству и безопасной эксплуатации газобаллонных автомобилей // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2016. Т. 1 (47). С. 47–53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25582769>
3. *Парфененко А.П., Тимофеев А.Б.* Проблемы нормирования противопожарных расстояний на территории многотопливных автозаправочных станций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 99–103. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-99-103
4. *Parfyonenko A.P., Timofeev A.B.* Assessment of designing multi-fuel filling stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1001. Issue 1. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068
5. *Шавалиев Р.Р., Ягудин Р.И., Валеев Д.О., Елизарьева Е.Н., Марванов Р.В.* Обеспечение пожарной безопасности автогазозаправочных станций в городе // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 1–2. С. 49–59.
6. *Хамидуллина Е.А., Ольгина Е.А.* Автогазозаправочные станции как источник техногенной опасности // XXI век. Техносферная безопасность. 2016. Т. 1. № 2 (2). С. 21–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168218>
7. *Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш., Рубцов Д.И., Рубцов В.В.* Оценка расчетных величин пожарного риска на территории газораспределительной станции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 1. С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.32-42
8. *Швырков С.А., Воробьев В.В., Петров А.П., Шайхулов С.Ф.* Снижение пожарной опасности зданий, проектируемых вблизи автомобильных газозаправочных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 1. С. 13–19. DOI: 10.25257/FE.2018.1.13-19
9. *Филиппов В.Н., Шебеко Ю.Н., Пономарев В.М., Навценя В.Ю., Беспалько В.В., Плицына О.В.* Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 11. С. 41–51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51
10. *Филиппов В.Н., Попов В.Г., Беспалько С.В., Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю.* Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49
11. *Костюхин А.Н.* Исследование и усовершенствование способов противопожарной защиты баллонов со сжиженными углеводородными газами : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 161 с.
12. *Droste B., Schoen W.* Full-scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks // Journal of Hazardous Materials. 1988. Vol. 20. Pp. 41–53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8
13. *Droste B., Schoen W., Probst U.* Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks // Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries : 6th International Loss Prevention Symposium [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]. 1989. Vol. IV. Pp. 51–1–17.
14. *Droste B.* Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings // Fire Technology. 1992. Vol. 28. Pp. 257–269. DOI: 10.1007/BF01857695
15. *Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F.* An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Issue 6. Pp. 1484–1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015
16. *Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G.* Impact of a distant wildland fire on an LPG tank // Fire Safety Journal. 2013. Vol. 61. Pp. 100–107. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2013.08.003
17. *Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V.* Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 114. Pp. 251–270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013
18. *Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V.* Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 147. Pp. 693–702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002
19. *Rum A., Landucci G., Galletti C.* Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 53. Pp. 115–128. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.006
20. *Ming-shu Bi, Jing-jie Ren, Bo Zhao, Wei Che.* Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks // Journal of Hazardous Materials. 2011.

Vol. 192. Issue 2. Pp. 874–879. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.107

21. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank // *Journal of Hazardous Materials*. 1988. Vol. 20. Pp. 55–71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7

22. Александренко М.В., Акулова М.В., Ибрагимов А.М. Математическое моделирование пожаров // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 4–1 (35). С. 28–29.

23. Хусаинов Ф.И. Использование программы SPSS для поиска зависимостей между переменными // *Вестник транспорта*. 2015. № 4. С. 33–37.

## REFERENCES

- Nikolaychuk L.A., Dyakonova V.D. Current state and prospects of development of the market of gas motor fuel in Russia. *Online Journal of Science Studies*. 2016; 8(2):1-9. DOI: 10.15862/106EVN216 (rus).
- Pevnev N.G., Rayenbagina E.R. Improving the regulations for the production and safe operation of the gas automobile. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 1(47):47-53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25582769> (rus).
- Parfyonenko P., Timofeev A.B. Problems of fire-fighting distance on the territory of multi-fuel filling stations. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021; 2(36):99-103. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-99-103 (rus).
- Parfyonenko P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 1001(1):1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068
- Shavaliyev R.R., Yagudin R.I., Valeev D.O., Elizareva E.N., Marvanov R.V. Ensuring fire safety for autogas filling stations in town. *Bulletin of Scientific Research Result*. 2017; 1-2:49-59. (rus).
- Khamidullina E.A., Olgina E.A. Gas filling stations as a source of technogenic hazards. *Technosphere Safety. XXI Century*. 2016; 1(2):21-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168218> (rus).
- Gudin S.V., Khabibulin R.Sh., Rubtsov D.I., Rubtsov V.V. Evaluation of fire risk values in the territory of a gas distribution station. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(1):32-42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.32-42 (rus).
- Shvyrkov S.A., Vorobyev V.V., Petrov A.P., Shaikhulov S.F. Substantiating the geometric parameters of the fire wall in order to ensure fire safety of buildings designed close to automobile gas stations. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2018; 1:13-19. DOI: 10.25257/FE.2018.1.13-19 (rus).
- Filippov V.N., Shebeko Yu.N., Ponomarev V.M., Navtsenya V.Yu., Bepalco S.V., Plitsina O.V. Modeling of the behavior of the railway LPG tank in the hearth flame. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):41-51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51 (rus).
- Filippov V.N., Popov V.G., Bepalko S.V., Shebeko Yu.N., Navtsenya V.Yu. Results of complex researches of fire and explosion safety of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):43-49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49 (rus).
- Kostyukhin A.N. *Research and improvement of methods of fire protection of cylinders with liquefied petroleum gases : Cand. Tech. Sci. Diss.* Moscow, 2010; 161. (rus).
- Droste B., Schoen W. Full-scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks. *Journal of Hazardous Materials*. 1988; 20:41-53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8
- Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries : 6th International Loss Prevention Symposium [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]*. 1989; IV:51-1-17.
- Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings. *Fire Technology*. 1992; 28:257-269. DOI: 10.1007/BF01857695
- Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(6):1484-1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015
- Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank. *Fire Safety Journal*. 2013; 61:100-107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.003
- Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 114:251-270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013
- Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in wildland-industrial interface. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 147:693-702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002
- Rum A., Landucci G., Galletti C. Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 53:115-128. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.006
- Ming-shu Bi, Jing-jie Ren, Bo Zhao, Wei Che. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks.

- Journal of Hazardous Materials*. 2011; 192(2): 874-879. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.107
21. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank. *Journal of Hazardous Materials*. 1988; 20: 55-71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7
22. Aleksandrenko M.V., Akulova M.V., Ibragimov A.M. Mathematical modelling of the fire. *International Research Journal*. 2015; 4-1(35):28-29. (rus).
23. Khusainov F.I. Using the SPSS program to find dependencies between variables. *Transport Massanger*. 2015; 4:33-37. (rus).

*Поступила 24.10.2022, после доработки 15.11.2022;  
принята к публикации 28.11.2022*

*Received October 24, 2022; Received in revised form November 15, 2022;  
Accepted November 28, 2022*

### Информация об авторах

**ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

**ТИМОФЕЕВ Артем Борисович**, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0001-6645-4302; Author ID: 1073991; e-mail: timofeev-ab@list.ru

#### Вклад авторов:

**Парфененко А.П.** — научное руководство; развитие методологии; сбор материала; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.

**Тимофеев А.Б.** — сбор материала; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors

**Aleksander P. PARFENENKO**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

**Artem B. TIMOFEEV**, Postgraduate Student of of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6645-4302; Author ID: 1073991; e-mail: timofeev-ab@list.ru

#### Authors' contribution:

**Aleksander P. Parfenenko** — scientific guidance; methodology development; material collection; material processing; article writing; scientific text editing.

**Artem B. Timofeev** — material collection; material processing; writing an article; scientific text editing.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий

Александр Андреевич Комаров ✉, Дмитрий Александрович Корольченко,  
Николай Викторович Громов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Представлены результаты испытаний одинарного и двойного остекления, используемого в качестве легкобрасываемых конструкций (ЛСК) для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений при внутренних аварийных взрывах. Критерием сравнительной эффективности ЛСК является значение максимального давления внутри помещения, реализуемого вследствие аварийного дефлаграционного взрыва и срабатывания легкобрасываемой конструкции. Чем ниже максимальное давление при прочих равных условиях (объем помещения, площадь сбросного проема, вид взрывоопасной смеси), тем выше эффективность ЛСК.

**Цель и задачи.** Целью настоящего исследования является экспериментальное определение эффективности остекления, используемого в качестве легкобрасываемых конструкций, при аварийных дефлаграционных взрывах внутри зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально определить давление вскрытия ЛСК в виде одинарного и двойного остекления при внутреннем дефлаграционном взрыве;
- определить максимальное давление внутри взрывной камеры при использовании ЛСК в виде остекления;
- провести сравнительный (в том числе численный) анализ результатов экспериментальных исследований для подтверждения точности определения давления вскрытия ЛСК;
- сравнить результаты экспериментальных исследований с расчетными значениями давления вскрытия ЛСК, полученными с помощью методик, рекомендуемых нормативными документами.

**Методы исследования.** При проведении испытаний ЛСК была использована взрывная камера с рабочим объемом 8 м<sup>3</sup> и площадью сбросного проема 1,3 м<sup>2</sup>. Таким образом, удельная площадь ЛСК составляла 0,16 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup>, что в 3,2 раза больше рекомендуемой нормативными документами. Поэтому превышение максимального давления внутри взрывной камеры свыше пороговых значений (5–7 кПа) однозначно указывает на неэффективность работы ЛСК.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты испытаний одинарного остекления толщиной 4 мм и площадью 1 м<sup>2</sup> (соответствует требованиям п. 6.2.30 СП 56.13330.2021) показали, что такое остекление неэффективно в качестве ЛСК. Избыточное давление вскрытия и максимальное давление в помещении даже при избыточной необходимой площади сбросного проема имеет высокие значения:  $P_{вск} = 11$  кПа,  $P_{max} = 12$  кПа. Такие нагрузки являются разрушающими для промышленных зданий и сооружений.

Высокие значения давления вскрытия (14,7 и 17,7 кПа) и максимального давления в камере (17,7 и 20,5 кПа) позволяют сделать вывод о неэффективности работы также и двойного остекления в качестве ЛСК.

При испытаниях как одинарного, так и двойного остекления наблюдался значительный разлет осколков (до 30 м в глубину и до 13 м в ширину), что в случае аварии может привести к поражению людей, находящихся рядом со зданием в момент аварии.

**Выводы.** Эксперименты показали, что предполагаемые (расчетные) давления вскрытия остекления, рекомендуемые рядом нормативных документов и научных публикаций, могут значительно отличаться от реальных значений, что может послужить причиной обрушений зданий при аварийных внутренних взрывах.

**Ключевые слова:** дефлаграция; легкобрасываемая конструкция; сбросной проем; взрывные нагрузки; давление вскрытия

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект #FSWG-2020-0007).*

**Для цитирования:** Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В. Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 78–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90

✉ Комаров Александр Андреевич, e-mail: KomarovAA@mgisu.ru

# Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents

Alexander A. Komarov ✉, Dmitriy A. Korolchenko,  
Nikolay V. Gromov

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

## ABSTRACT

**Introduction.** The authors present the results of testing single and double glazing, used as explosion relief structures (ERS) to ensure the explosion resistance of buildings and structures in case of indoor explosions caused by accidents. The criterion of comparative effectiveness of ERS is the value of maximum pressure inside the premises caused by an emergency deflagration explosion and the response of an explosion relief structure. The lower the maximum pressure under otherwise equal conditions (the volume of the room, the area of the relief opening, the type of the explosive mixture), the higher the ERS effectiveness.

**Goal and objectives.** The purpose of this study is to experimentally determine the effectiveness of glazing used as an explosion relief structure in case of emergency deflagration explosions inside buildings.

It is necessary to solve the following tasks to attain the pre-set goal:

- experimentally determine the relief pressure of ERS, or single and double glazing during an indoor deflagration explosion;
- determine the maximum pressure inside the explosion chamber using glazing as ERS;
- conduct the comparative (also numerical) analysis of the results of experimental studies to confirm the accuracy of the ERS relief pressure value;
- compare the results of experimental studies with the calculated values of the ERS relief pressure obtained using the methods recommended in the regulatory documents.

**Research methods.** In the course of ERS testing, an explosion chamber, having the operating volume of 8 m<sup>3</sup> and the relief opening area of 1.3 m<sup>2</sup> was used. Hence, the specific area of the ERS was 0.16 m<sup>2</sup> per 1 m<sup>3</sup>, which is 3.2 times higher than that recommended in the regulatory documents. Therefore, any pressure, exceeding the threshold values (5–7 kPa) inside the explosion chamber, unambiguously shows the ERS inefficiency.

**Results and their discussion.** The results of testing the 4 mm single glazing and the area of 1 m<sup>2</sup> (meeting the requirements of paragraph 6.2.30 of SP (Construction Regulations) 56.13330.2021) show that such glazing is ineffective as the ERS. Excessive relief pressure and maximum pressure in a room with an extra area of the relief opening have high values:  $P_{rel} = 11$  kPa;  $P_{max} = 12$  kPa. Such loadings are destructive for industrial buildings and structures.

High values of relief and maximum pressures (14.7 and 17.7 kPa) in a chamber (17.7 and 20.5 kPa) allow drawing a conclusion about the inefficiency of double glazing as ERS.

In the course of testing both single and double glazing, considerable glass fragment dispersion (up to 30 m deep and up to 13 m wide) was observed, which could result in the injury of people near the building during an accident.

**Conclusions.** Experiments have shown that the assumed (calculated) glazing deflagration pressures, recommended by a number of regulatory documents and research publications, may differ significantly from the actual values, which may cause building collapses as a result of indoor explosions.

**Keywords:** deflagration; easily discharged structures; relief opening; explosive loading; relief pressure

*This work was supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project #FSWG-2020-0007).*

**For citation:** Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):78-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90

✉ Alexander Andreevich Komarov, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

## Введение

подавляющее большинство проектировщиков и специалистов, эксплуатирующих взрывоопасные производства, считают, что остекленные оконные проемы будут гарантированно освобождены от стекла при возможном аварийном взрыве [1–3]. Эта уверенность основывается на повседневном опыте, который говорит о хрупкости стекла и подтверждается статическими испытаниями, определяющими параметры вскрытия (разрушения)

стекла при воздействии на него нагрузки. Результаты экспериментальных исследований, приведенных в настоящей статье, говорят о том, что вскрытие стекла при воздействии на него динамической нагрузки со значительным градиентом давления, что характерно для аварийных взрывов, может происходить при значительно более высоких уровнях давления, чем принято считать в настоящее время [4–9]. Данное обстоятельство позволяет говорить о влиянии сценария развития взрывной аварии на способность остекленных предохранительных

конструкций (остекленных окон) выполнять функцию сбросного проема.

Прежде всего необходимо напомнить распространенные соотношения, описывающие процесс вскрытия сбросного проема (освобождения проема от остекления). Принято считать, что коэффициент вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла, характеризуемый отношением площади образовавшегося в застекленном проеме отверстия  $F_{пр}$  к площади незастекленного проема  $S_{пр}$ , зависит от величины избыточного давления в здании  $P$  и от избыточного давления, при котором происходит начальное разрушение стекол  $P_{вск}$ . По данным, приведенным, например, в источнике [1, 10, 11], коэффициент вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла  $\Phi$  равен:

$$\Phi \left( \frac{P}{P_{вск}} \right) = \frac{F_{пр}}{S_{пр}} = 1 - \exp \left[ -0,12 \cdot \left( \frac{P}{P_{вск}} - 1 \right)^{2,5} \right], \quad (1)$$

где  $P_{вск}$  — избыточное давление, при котором происходит вскрытие стекол, которое зависит от размера единичной ячейки ( $a$  и  $b$ ) и толщины стекла:

$$P_{вск} = 3k\phi, \quad (2)$$

$k$  — коэффициент, учитывающий поправку на площадь ( $F$ ) и толщину стекла ( $H$ );

$\phi$  — коэффициент, учитывающий форму стекла.

Коэффициенты  $k$  и  $\phi$  определяются по соответствующим таблицам и рисункам (см., например, [1]). Так, для стекла толщиной  $H = 4$  мм и площадью  $F = 1$  м<sup>2</sup> получаем, что давление вскрытия составляет  $P_{вск} = 3 \cdot 0,55 \cdot 1,15 = 1,90$  кПа.

Целью данной работы является экспериментальное определение эффективности остекления, используемого в качестве легкообрасываемых конструкций, при аварийных дефлаграционных взрывах внутри зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально определить давление вскрытия ЛСК в виде одинарного и двойного остекления при внутреннем дефлаграционном взрыве;
- определить максимальное давление внутри взрывной камеры при использовании ЛСК в виде остекления;
- провести сравнительный (в том числе численный) анализ результатов экспериментальных исследований для подтверждения точности определения давления вскрытия ЛСК;
- сравнить результаты экспериментальных исследований с расчетными значениями давления вскрытия ЛСК, полученными с помощью рас-

четных методик, рекомендуемых нормативными документами.

## Методы исследования

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение процесса вскрытия остекления при воздействии на него взрывного давления, реализуемого при авариях.

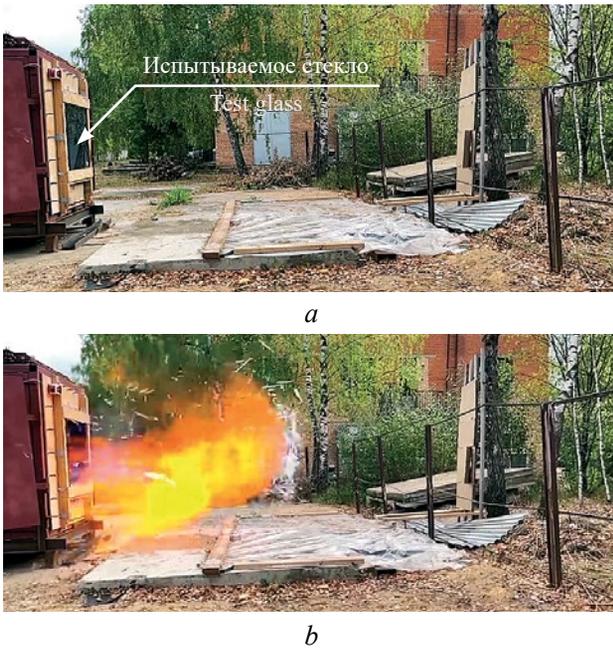
Экспериментальные исследования проводились в кубической камере с линейным внутренним размером 2 м. Площадь единственного сбросного проема, расположенного на одной из граней кубической камеры, составляла 1080×1080 мм. Сбросной проем перекрывался одинарным обычным стеклом с толщиной 4 мм. Размеры полотна составляли 1×1 м. Стекло вставлялось в проем и крепилось на штапики с резиновыми уплотнителями. Измерение взрывного давления осуществлялось двумя датчиками измерения избыточного давления APZ 3420, частота выборки сигнала с датчиков давления составляла 5000 Гц (интервал времени между отсчетами давления составлял 0,2 мс). Фиксация процесса взрыва и процесса вскрытия стекла осуществлялась высокоскоростной камерой Evercam F 1000-4-C, которая позволяла проводить видеосъемку со скоростью 500 кадров в секунду. В качестве горючего использовался пропан. Смесь стехиометрического состава, которой полностью заполняли камеру, воспламенялась искрой, расположенной в центре камеры. Процесс регистрации сигнала с датчиков давления и процесс киносъемки были полностью синхронизированы.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 — фотография исходного состояния камеры с установленным в сбросном проеме одинарным стеклом и фотография момента взрыва пропановоздушной смеси в камере. Фотография, приведенная на рис. 1, *b*, соответствует 350 мс после воспламенения смеси. Перед фронтом пламени, выброшенным из сбросного проема, находятся осколки выбитого стекла. Разлет осколков составлял около 25 м. Картонная мишень, расположенная напротив сбросного проема, была достаточно сильно повреждена осколками стекла.

На рис. 2 приведена осциллограмма взрывного давления, полученная в ходе эксперимента. Полезный сигнал при помощи цифровой фильтрации был очищен от высокочастотных шумов (выше 100 Гц).

Анализ узкополосного спектра взрывного давления показал, что основная волновая энергия концентрируется на низких частотах (ниже 100 Гц). Поэтому, собственно, само взрывное давление плохо воспринимается человеком, который регистри-

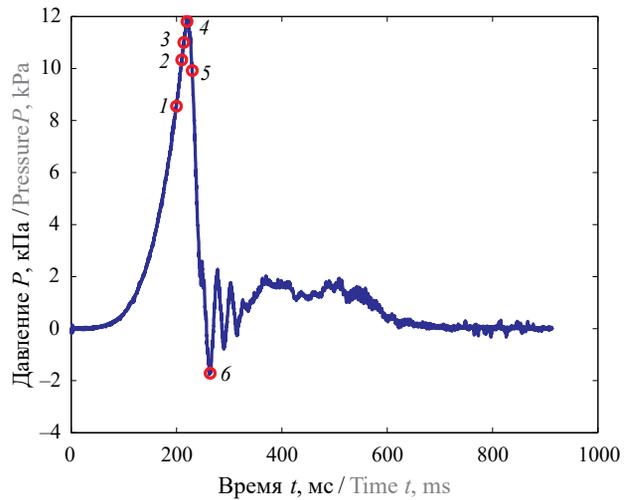


**Рис. 1.** Начальное состояние испытательной камеры (а) и процесс взрыва (б)

**Fig. 1.** Initial condition of the testing chamber (a) and the explosion (b)

рует звуковые колебания, начиная только с 20 Гц и выше.

Анализ спектрального состава взрывного давления показал, что интенсивность звуковой волны (в частотном диапазоне от 22,5 Гц и выше) составила 154,2 дБ. Интенсивность волны в инфразвуко-

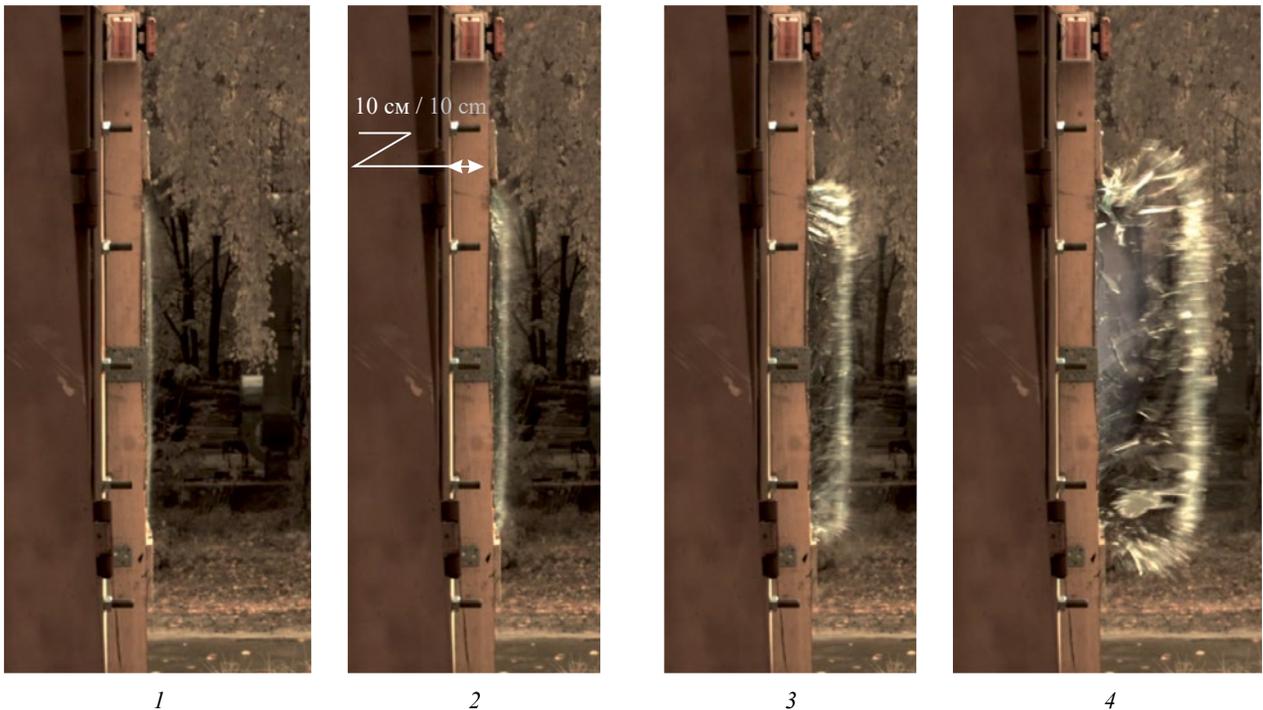


**Рис. 2.** Взрывное давление, очищенное от высокочастотных составляющих (более 100 Гц). Время: 1 — 200 мс; 2 — 210 мс; 3 — 214 мс; 4 — 220 мс; 5 — 230 мс; 6 — 264 мс. Давление: 1 — 8,59 кПа; 2 — 10,29 кПа; 3 — 10,98 кПа; 4 — 11,80 кПа; 5 — 9,83 кПа; 6 — -1,62 кПа

**Fig. 2.** Explosive pressure and time. Time: 1 — 200 ms; 2 — 210 ms; 3 — 214 ms; 4 — 220 ms; 5 — 230 ms; 6 — 264 ms. Pressure: 1 — 8.59 kPa; 2 — 10.29 kPa; 3 — 10.98 kPa; 4 — 11.80 kPa; 5 — 9.83 kPa; 6 — -1.62 kPa

вом диапазоне составила 169,1 дБ, а общая интенсивность взрывной волны составила 170,5 дБ.

На рис. 3 приведены фотографии нескольких моментов процесса вскрытия остекления. Первая фотография (рис. 3) соответствует 210 мс, давление взрыва составляло 10,29 кПа; вторая фотография



**Рис. 3.** Различные моменты процесса вскрытия остекления под воздействием взрывного давления: 1 — 210 мс (10,29 кПа); 2 — 214 мс (10,98 кПа); 3 — 220 мс (11,80 кПа); 4 — 230 мс (9,83 кПа)

**Fig. 3.** The glazing relief process under the influence of explosive pressure: 1 — 210 ms (10.29 kPa); 2 — 214 ms (10.98 kPa); 3 — 220 ms (11.80 kPa); 4 — 230 ms (9.83 kPa)

соответствует 214 мс (давление взрыва 10,98 кПа); третья фотография соответствует 220 мс (давление взрыва 11,80 кПа); четвертая фотография — 230 мс (давление взрыва 9,83 кПа). Моменты времени, соответствующие фотографиям, приведенным на рис. 3, отмечены на осциллограмме рис. 2 точками (2, 3, 4, 5).

Анализ экспериментального материала позволяет говорить о том, что вскрытие одинарного остекления произошло при давлениях, имеющих порядок величины около 10 кПа, а не 2 кПа, как это было получено нами ранее при использовании формулы (2), являющейся достаточно распространенной формулой для определения давления вскрытия стекла при воздействии на него взрывной нагрузки.

Например, из первой фотографии рис. 3, соответствующей 210 мс взрыва и давлению 10,29 кПа, следует, что при данном давлении стекло только-только начинает прогибаться, а всего через 4 мс после этого момента прогиб стекла на краях полотна становится критическим (вторая фотография рис. 3) и происходит разрушение остекления. Еще через 6 мс (третья фотография рис. 3) реализуется максимальное давление, что указывает на факт вскрытия достаточной площади сбросного проема или освобождения достаточной площади сбросного проема от стекла. После этого слой разрушенного стекла выносится газовым потоком, истекающим из сбросного проема (четвертая фотография рис. 3). Движение слоя разрушенного стекла перед газовым потоком хорошо иллюстрирует фотография, приведенная на рис. 1, *b*.

Именно так происходит вскрытие остекления при аварийных взрывах, имеющих значительные градиенты взрывного давления.

Таким образом, анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение стекла становится заметным только на 233 кадре, который соответствует 200 мс и взрывному давлению 8,59 кПа, начальный прогиб стекла фиксируется на 210 мс взрыва при давлении 10,29 кПа, а его разрушение (вскрытие) по краям полотна происходит на 214 мс при давлении 10,98 кПа.

Учитывая значительный градиент взрывного давления, что следует из приведенной на рис. 2 осциллограммы давления взрыва, необходимо провести более тщательный и детальный анализ процесса вскрытия остекления. С этой целью проанализируем полученную в ходе эксперимента осциллограмму взрывного давления.

Предварительно необходимо коротко описать методику определения параметров вскрытия сбросного проема по экспериментальным данным, описывающим взрывное давление, или, говоря другими словами, при помощи численного анализа достаточно подробной (интервал опроса датчиков давле-

ния составлял 0,2 мс) осциллограммы взрывного давления [12–15].

Фронт пламени на начальных этапах развития дефлаграционного взрыва в кубической камере и при центральном воспламенении смеси имеет сферическую форму [16–18]. Например, на рис. 4 приведена фотография фронта пламени в кубическом объеме, имеющем аналогичные с используемой нами камерой линейные размеры, и при центральном воспламенении пропановоздушной смеси стехиометрического состава.

Поэтому рост давления на начальных этапах развития взрыва в замкнутом объеме может быть определен по следующему соотношению [2, 19–22]:

$$\frac{dP}{dt} = \gamma \frac{4\pi(U \cdot t)^2 U \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{V} P_0 = \gamma \frac{4\pi R^2 U \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{V} P_0, \quad (3)$$

где  $P$  — избыточное давление взрыва;

$\gamma$  — показатель адиабаты воздуха ( $\gamma = 1,4$ );

$U$  — видимая скорость пламени;

$\varepsilon$  — степень расширения продуктов взрыва;

$V$  — объем камеры;

$R$  — радиус сферического фронта пламени;

$P_0$  — атмосферное давление ( $P_0 = 101,3$  кПа).

Для замкнутого объема временная зависимость внутреннего давления на начальном этапе взрыва может быть определена по следующему соотношению, которое является интегралом соотношения (3):

$$P = \gamma \frac{4\pi(U \cdot t)^3 \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{3V} P_0 = \gamma \frac{4\pi R^3 \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{3V} P_0, \quad (4)$$

где  $R$  — радиус сферического фронта пламени.

Следовательно, темп роста давления определяется, следуя (3), радиусом фронта пламени и видимой скоростью пламени, а взрывное давление, следуя (4), определяется текущим значением

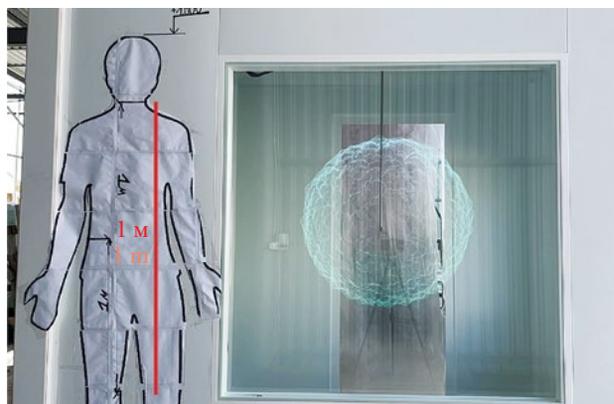


Рис. 4. Взрыв пропановоздушной смеси при центральном ее воспламенении в кубическом объеме

Fig. 4. Propane-air mixture explosion during ignition in the centre of the cubic volume

(радиусом) фронта пламени. Поэтому видимую скорость пламени на начальных этапах развития взрыва можно определить, располагая подробной временной зависимостью взрывного давления.

Проанализируем указанным способом осциллограмму взрывного давления, которая приведена на рис. 5.

При вскрытии остекления площадь сбросного проема увеличивается и в определенный момент времени темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом. В этом случае происходит перегиб в осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить, анализируя осциллограмму давления. Для указанной процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давления (между 185 и 217 мс), который выделен на рис. 5 красным цветом.

На рис. 6 приведены результаты обработки данного участка осциллограммы. На верхнем графике рис. 6 приведен фрагмент осциллограммы взрывного давления, а на нижнем приведена производная данного фрагмента осциллограммы. Перед дифференцированием временная зависимость давления интерполировалась полиномом 5-й степени для сглаживания экспериментальных точек, что позволяет получать достоверные данные о ее производной. Интерполяционная кривая, которая впоследствии численно дифференцировалась, выделена на рис. 6 синим цветом. В точке, соответствующей моменту времени  $t = 211$  мс, производная имеет максимум, который означает факт превышения темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем

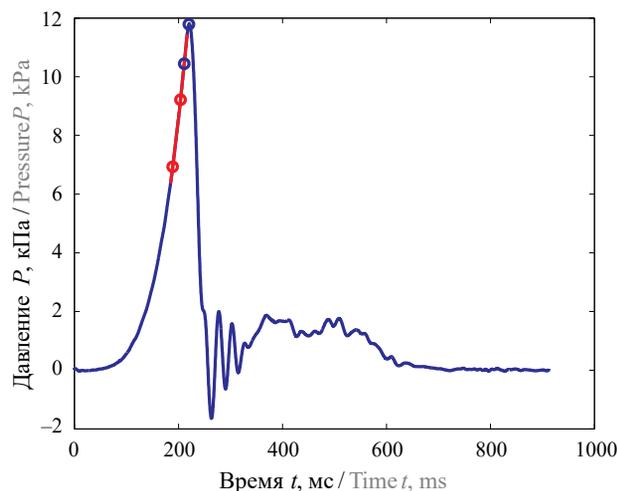


Рис. 5. Осциллограмма взрывного давления, очищенная от шумов, с указанием анализируемого участка

Fig. 5. Explosive pressure oscillogram, cleared of noise, showing the analyzed section

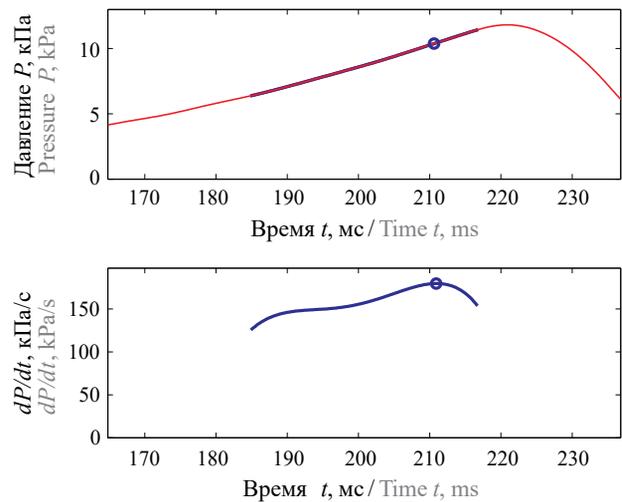


Рис. 6. Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в испытательной камере: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; нижний график — производная фрагмента осциллограммы

Fig. 6. Results of processing the oscillogram of explosive pressure in the testing chamber: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the bottom graph is the derivative of the oscillogram fragment

над темпом нарастания давления за счет взрывного горения.

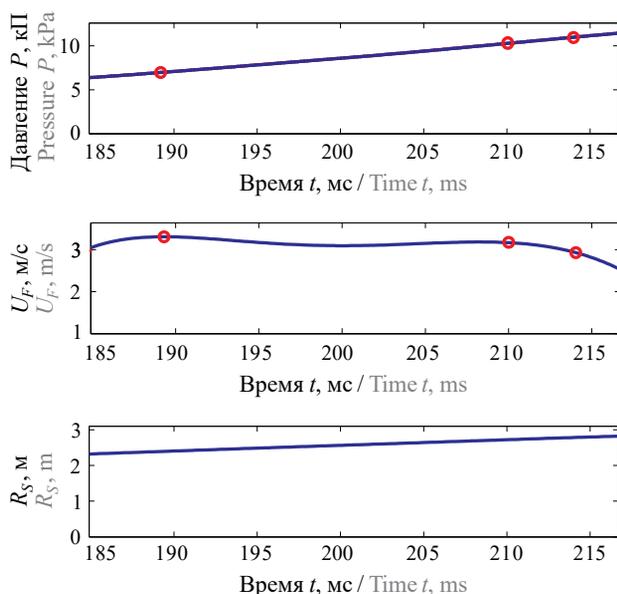
Из рис. 6 следует, что максимальное значение производной взрывного давления реализуется при  $t = 211$  мс и составляет 179,7 или 0,18 кПа/мс. Этому моменту времени ( $t = 211$  мс) соответствует взрывное давление 10,44 кПа.

Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение стекла становится заметным только на 233-м кадре, который соответствует 200 мс и взрывному давлению 8,59 кПа. Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что заметное вскрытие сбросного проема (стекло сломалось) произошло на 211 мс при взрывном давлении 10,44 кПа.

Учитывая значительную динамику роста взрывного давления (максимальный темп роста давления составлял около 179,7 кПа/с), следует более детально рассмотреть вопрос вскрытия стекла. Анализ экспериментальной осциллограммы взрывного давления осуществлялся с учетом уравнений (3), (4) и сопутствующих их описанию замечаний.

На рис. 7 приведены результаты расчета видимой скорости пламени.

На верхнем графике рис. 7 приведен обрабатываемый участок осциллограммы давления, на среднем графике рис. 7 приведен расчет видимой скорости пламени, выполненный по формуле (3), а на нижнем — расчет радиуса фронта пламени, соответствующий текущему значению взрывного давления. Расчет радиуса фронта пламени проводился по формуле (4).



**Рис. 7.** Результаты обработки фрагмента осциллограммы взрывного давления: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; средний график — видимая скорость пламени; нижний график — радиус фронта пламени

Fig. 7. Results of processing the fragment of the explosive pressure oscillogram: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the middle graph is the flame velocity; the bottom graph is the radius of the flame front

Из данного рисунка следует, что максимальное значение видимой скорости пламени составляет 3,31 м/с. Максимальное значение видимой скорости пламени реализуется вплоть до 210 мс, которому соответствует взрывное давление 10,29 кПа. Этому моменту времени (210 мс) соответствует значительный прогиб стекла. Разрушение стекла по кино съемке происходит на 214 мс, которая соответствует 240 кадру (2-я фотография рис. 3). Реализуемое при этом давление составляет 10,98 кПа. На этот момент времени приходится формальный спад видимой скорости пламени, что видно из рис. 7.

Таким образом, с 214 мс начинается происходить снижение темпа роста взрывного давления, что приводит к формальному (в соответствии с расчетами для замкнутого объема, выполненными по формулам (3) и (4)) снижению видимой скорости пламени, а в реальности это говорит о том, что произошла разгерметизация объема. При снижении расчетной скорости на 5 % (на рис. 7 максимальный уровень и снижение скорости на 5 % отмечено красными точками на осях ординат) можно говорить о гарантированном вскрытии проема или освобождении его от остекления. Этому моменту времени (214 мс) соответствует взрывное давление 10,98 кПа.

Таким образом, анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показал, что вскрытие

стекла произошло примерно на 214 мс при взрывном давлении 10,98 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении эксперимента составило не более 3,31 м/с.

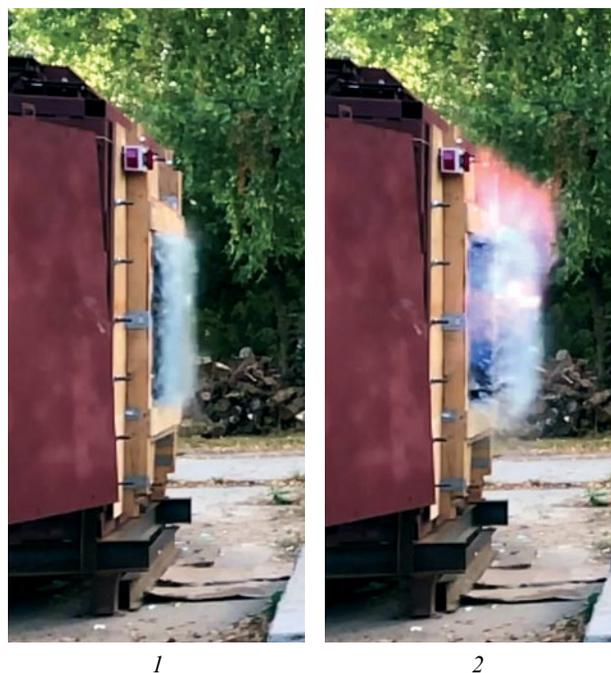
Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное разрушение стекла произошло примерно в это же время. Поэтому разрушение стекла можно контролировать по результатам скоростной киносъемки.

Рассмотрим результаты эксперимента с двойным остеклением. Регистрация процесса взрыва осуществлялась двумя скоростными камерами. Скорость фиксации первой камеры составляла 500 кадров в секунду или временной интервал между кадрами был равен 2,0 мс, а скорость протяжки второй камеры была равна 162 кадрам в секунду или временной интервал между кадрами составлял 6,19 мс.

На рис. 8 приведены фотографии двух моментов взрыва, зафиксированных второй скоростной камерой. Фотографии, полученные с относительно малой скоростью протяжки, т.е. со второй камеры, более четкие и яркие, поэтому лучше иллюстрируют процесс вскрытия двойного остекления.

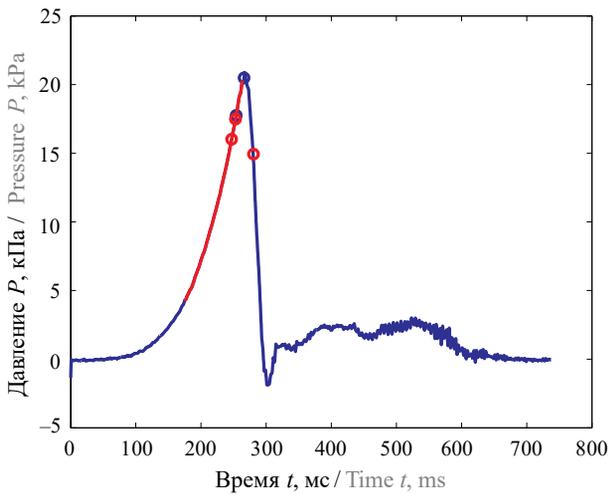
На рис. 9 приведена осциллограмма взрывного давления в камере для рассматриваемого эксперимента.

Точками на рис. 9 отмечены моменты времени, соответствующие следующим значениям (в порядке



**Рис. 8.** Моменты вскрытия двойного остекления под воздействием взрывного давления: 1 — 266 мс (20,49 кПа); 2 — 280 мс (14,95 кПа)

Fig. 8. Double glazing relief under explosive pressure: 1 — 266 ms (20.49 kPa); 2 — 280 ms (14.95 kPa)



**Рис. 9.** Осциллограмма взрывного давления в камере с проемом, перекрытым двойным остеклением

**Fig. 9.** Oscillogram of explosive pressure in a chamber with an opening blocked by double glazing

возрастания): 247, 253, 254, 266, 280 мс. Этим моментам соответствуют следующие значения избыточного давления взрыва: 16,02, 17,49, 17,76, 20,49, 14,95 кПа.

Сравнение двух фотографий (рис. 8) с фотографиями (рис. 3), где приведены фотографии процесса вскрытия одинарного остекления, показывает, что фотографии 3 и 4 рис. 3 примерно соответствуют моментам времени, изображенным на фотографиях 1 и 2 рис. 8. Фотография 1 (рис. 8) соответствует моменту реализации максимального давления в камере (см. осциллограмму давления на рис. 9). Аналогичному моменту времени соответствует фотография 3 рис. 3, на которой изображен момент реализации максимального давления в камере с одинарным остеклением (см. осциллограмму давления на рис. 2). Фотография 2 (рис. 8) соответствует начальному моменту спада взрывного давления в камере (см. осциллограмму давления на рис. 9). Аналогичную ситуацию фиксирует фотография 4 (рис. 3), но при взрыве в камере с одинарным остеклением (см. осциллограмму давления на рис. 2). При этом максимальные давления отличаются практически в два раза: для одинарного остекления максимальное давление составляло 11,80 кПа, а для двойного остекления максимальное давление было значительно выше и составляло 20,49 кПа.

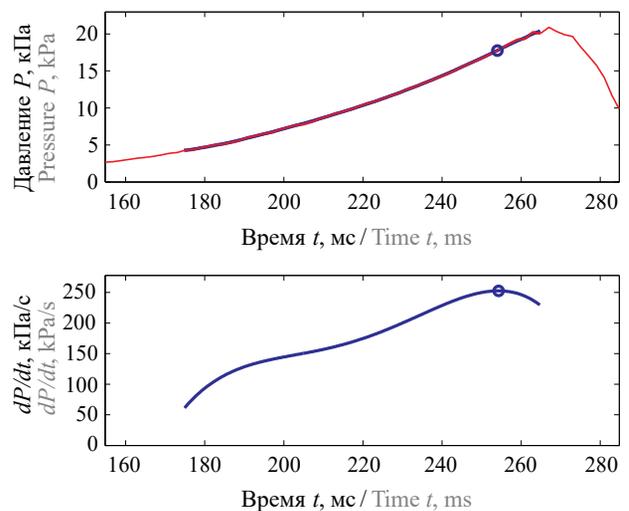
Подробный анализ процесса вскрытия стекла, приведенный ниже, осуществлялся по фотографиям, полученным с первой кинокамеры, имевшей скорость 500 кадров в секунду. Анализ этих фотографий показал, что начальное движение стекла (начало вскрытия стекла) становится заметным только на 247 мс процесса взрыва, которому соответствует взрывное давление 16,02 кПа. Ракурс кино съемки со второй кинокамеры позволил наблю-

дать, как в определенный момент происходит разрушение внутреннего стекла (заднего стекла). Взрывное давление при этом лежит в диапазоне от 14 до 16 кПа. Именно при таких давлениях, как показали предыдущие опыты, проведенные при одинарном остеклении, происходит освобождение проема от одинарного остекления данного размера. Внешнее стекло начинает прогибаться при давлении 17,76 кПа, что видно на фотографиях, полученных с первой камеры. И только при давлении 20,49 кПа происходит вскрытие внешнего стекла, которое реализуется на 266 мс после воспламенения смеси.

Завершив анализ фотоматериалов, проанализируем полученную в рассматриваемом эксперименте осциллограмму взрывного давления, приведенную на рис. 9. Как указывалось ранее, при вскрытии остекления площадь сбросного проема увеличивается и в определенный момент темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом. В этом случае происходит перегиб в осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить, анализируя осциллограмму давления. Для указанной процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давления (между 175 и 265 мс), который выделен на рис. 9 красным цветом.

На рис. 10 приведены результаты обработки данного участка осциллограммы.

На верхнем графике рис. 10 приведен фрагмент осциллограммы взрывного давления, а на нижнем



**Рис. 10.** Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в камере с двойным остеклением: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; нижний график — производная фрагмента осциллограммы

**Fig. 10.** Results of processing the oscillogram of explosive pressure in the chamber with double glazing: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the bottom graph is the derivative of the oscillogram fragment

графике рис. 10 — производная данного фрагмента. В точке, соответствующей моменту времени  $t = 254$  мс, производная имеет максимум, который означает факт превышения темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем над темпом нарастания давления за счет взрывного горения.

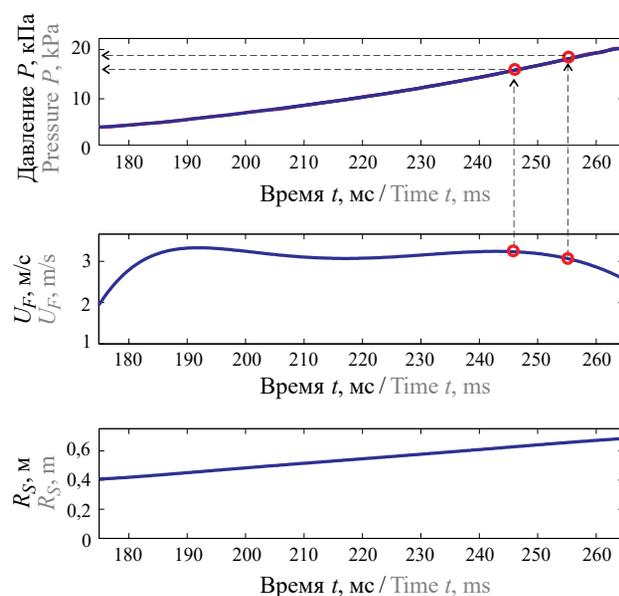
Из рис. 10 следует, что максимальное значение производной взрывного давления реализуется при  $t = 254$  мс и составляет 252,7 кПа/с или около 0,25 кПа/мс. Этому моменту времени ( $t = 254$  мс) соответствует взрывное давление 17,76 кПа.

Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение внутреннего стекла становится заметным примерно на 247 мс при взрывном давлении 16,02 кПа, но при этом внешнее стекло еще не разрушено.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что заметное вскрытие сбросного проема (внутреннее стекло сломалось) произошло ранее, чем 254 мс, и раньше, чем реализовалось взрывное давление 17,76 кПа.

Учитывая значительную динамику роста взрывного давления (максимальный темп роста давления составлял около 252,7 кПа/с), следует более детально рассмотреть вопрос вскрытия стекла.

На рис. 11 приведены результаты расчета видимой скорости пламени. На верхнем графике рис. 11 приведен обрабатываемый участок осциллограммы давления, на среднем — видимая скорость пламени,



**Рис. 11.** Результаты обработки фрагмента осциллограммы взрывного давления: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; средний график — видимая скорость пламени; нижний график — радиус фронта пламени

Fig. 11. The results of processing the fragment of the oscillogram of explosive pressure: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the middle graph is the flame velocity; the bottom graph is the radius of the flame front

на нижнем — радиус фронта пламени, соответствующий текущему значению радиуса фронта пламени.

Из рисунка следует, что максимальное значение видимой скорости пламени составляет 3,33 м/с при ее среднем значении 3,09 м/с на рассматриваемом временном отрезке. Максимальное значение видимой скорости пламени реализуется вплоть до 247 мс, которому соответствует взрывное давление 16,02 кПа. Разрушение стекла по киносъемке происходит примерно на 254 мс. Реализуемое при этом давление составляет 17,76 кПа. На этот момент времени приходится формальный спад видимой скорости пламени, что видно из рис. 11.

Таким образом, с 254 мс начинает происходить снижение темпа роста взрывного давления, что приводит к формальному (в соответствии с расчетами для замкнутого объема) снижению видимой скорости пламени, а в реальности это говорит о том, что произошла разгерметизация объема. При снижении расчетной скорости на 5 % (на рис. 11 максимальный уровень и снижение скорости на 5 % отмечены красными точками на осях ординат) можно говорить о гарантированном вскрытии проема или ЛСК. Этому моменту времени (254 мс на графике рис. 11) соответствует взрывное давление 17,76 кПа.

Таким образом, анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показал, что вскрытие двойного остекления произошло примерно на 254 мс при взрывном давлении 17,76 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении эксперимента с двойным остеклением составляло не более 3,33 м/с. Среднее значение видимой скорости пламени на рассматриваемом временном отрезке составляло 3,09 м/с.

## Выводы

Анализ фотографий, полученных при помощи скоростной киносъемки, показал, что заметное движение одиночного стекла начинается на 200 мс процесса взрыва. Из осциллограммы взрывного давления следует, что этому моменту времени соответствует давление 8,59 кПа. Значительный прогиб стекла наблюдается примерно на 210 мс процесса взрыва. Этому моменту времени соответствует давление 10,29 кПа. Разрушение стекла по его границе происходит примерно через 4 мс или на 214 мс при давлении 10,98 кПа.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, и анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показали аналогичный результат.

При проведении экспериментальных исследований создавалась значительная динамика роста взрывного давления, максимальный темп роста давления составил 179,7 кПа/с. Максимальное значение взрывного давления составило 11,80 кПа и реализовалось на 220 мс после воспламенения смеси. Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении опыта составляло 3,31 м/с при средней скорости 3,00 м/с.

Анализ фотографий, полученных при помощи скоростной киносъемки, показал, что заметное движение внешнего стекла двойного остекления начинается примерно на 247 мс процесса взрыва. Взрывное давление составляет в этот момент 16,02 кПа, но при этом фотографии не указывают на факт разрушения стекла.

Из осциллограммы взрывного давления следует, что разрушение стекла или вскрытие сбросного проема произошло на 254 мс при давлении 17,76 кПа.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что гарантированное вскрытие проема также произошло на 254 мс при давлении 17,76 кПа, что подтверждает озвученный выше вывод о вскрытии остекления к этому моменту времени.

При проведении экспериментальных исследований создавалась значительная динамика роста взрывного давления, максимальный темп роста давления составил 252,7 кПа/с.

Максимальное взрывное давление реализовалось на 266 мс после воспламенения смеси и составило 20,49 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении опыта составляло 3,33 м/с при средней скорости 3,09 м/с.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что при значительных градиентах взрывного давления (150–250 кПа/с), что характерно при аварийных взрывах в относительно малых помещениях, например в типовых кухнях массовой застройки, остекленные оконные проемы могут не выполнять функцию сбросных проемов при аварийных взрывах. Вскрытие одинарного 4-миллиметрового стекла с площадью 1 м<sup>2</sup> произошло только при взрывном давлении 10,98 кПа, а вскрытие двойного остекления осуществилось при давлении в 20,49 кПа. Эксперименты показали, что предполагаемые (расчетные) давления вскрытия остекления, рекомендуемые рядом нормативных документов и научных публикаций, могут значительно отличаться от реальных значений, что может послужить причиной обрушений зданий при аварийных внутренних взрывах.

При испытаниях как одинарного, так и двойного остекления наблюдался значительный разлет осколков (до 30 м в глубину и до 13 м в ширину), что в случае аварии может привести к поражению людей, находящихся рядом со зданием в момент аварии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пилюгин Л.П.* Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М. : Стройиздат, 1988. 305 с.
2. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
3. *Gorev V.A., Korolchenko A.* Impact of the idle run of a rotating easily dumped structure on pressure in the room // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052069. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052069
4. *Поландов Ю.Х., Бабанков В.А.* Влияние места расположения источника воспламенения в помещении на развитие взрыва газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. № 3. С. 68–76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639722>
5. *Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S.* Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures // Combustion Science and Technology. 2010. Vol. 182. Issue 11. Pp. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415
6. *Гимранов Ф.М.* Оценка последствий взрыва бытового газа // Промышленная и экологическая безопасность. 2012. № 2 (64). С. 150–151.
7. *Чешко И.Д., Смирнов А.С., Тумановский А.А.* Загорание утечек бытового газа, инициированное электрическими аварийными режимами // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2017. № 4 (25). С. 77–85.
8. *Korolchenko A.D.* New protecting structures on buildings of explosive production // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. Issue. 1. P. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012011
9. *Cen K., Tang J.Y., Zhang Y., Wang F., Zha S.X., Luo M.* Safetymanagement effectiveness evaluation of indoor gas facilities based on SE-DEA // Oil & Gas Storage and Transportation. 2018. Vol. 37. Issue 5. Pp. 486–492, 532.
10. *Cen K., Song B., Shen R., Zhang Y., Yu W., Wang Q.* Dynamic characteristics of gas explosion and its mitigation measures inside residential buildings // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2019/2068958
11. *Xu Y., Yimiao H., Guowei M.* A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures // Underground Space. 2019.

- Vol. 5. Issue 4. Pp. 298–314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
12. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
  13. Корольченко О.Н., Корольченко А.Д. Определение давления вскрытия легкобрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921
  14. Koshiba Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane–nitrous oxide mixtures // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2017. Vol. 45. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
  15. Janès A. Hazard characterization and risks assessment of ATEX explosion, contribution to the improvement of industrial processes safety. Perrin, Laurent : Université de Lorraine. 2012. 160 p.
  16. Pan Z., Zhang Z., Yang H., Zhang P., Zhu Y. Experimental and numerical investigation on flame propagation and transition to detonation in curved channel // *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 118. P. 107036. URL: [ciece/article/pii/S1270963821005460](https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107036) DOI: 10.1016/j.ast.2021.107036
  17. Yang Z., Zhao K., Song X., Li B., Zhang D., Xie L. Effects of mesh aluminium alloys and propane addition on the explosion-suppression characteristics of hydrogen-air mixture // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Issue 70. Pp. 34998–35013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.035
  18. Kawabata M., Maeda K., Yamanaka M., Nakaoaka T., Kawabata K.S., Aoki K., Anupama G. et al. Intermediate luminosity type Iax Supernova 2019muj with narrow absorption lines: Long-lasting radiation associated with a possible bound remnant predicted by the weak deflagration model // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2021. Vol. 73. Issue 5. Pp. 1295–1314. DOI: 10.1093/pasj/psab075
  19. Yücel F.C., Habicht F., Arnold F., King R., Bohon M., Paschereit C.O. Controlled autoignition in stratified mixtures // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 232. P. 111533. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111533
  20. Zou Y., Li C. Structure design and characteristic analysis of a foam jetting pig for high-sulfur gas-liquid mixed pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. Vol. 94. P. 104070. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104070
  21. Li C., Kang Y., Zhang Y., Luo H. Effect of double holes on crack propagation in PMMA plates under blasting load by caustics method // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 116. P. 103103. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103103
  22. Altunışık A.C., Önalın F., Sunca F. Effects of concrete strength and openings in infill walls on blasting responses of RC buildings subjected to TNT explosive // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021. Vol. 45. Issue 4. Pp. 2525–2554. DOI: 10.1007/s40996-020-00563-x

## REFERENCES

1. Pilyugin L.P. *Constructions of explosive production facilities*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 305. (rus).
2. Komarov A.A. *Forecasting of loads from emergency deflagration explosions and assessment of the consequences of their impact on buildings and structures : Dissertation ... Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).
3. Gorev V.A., Korolchenko A. The effect of idling of a rotating easily resettable structure on the pressure in the room. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052069. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052069
4. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Effect of location source of fire in the room on the development of gas explosion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 3:68-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639722> (rus).
5. Bauvens K.R., Chaffee J., Dorofeev S. The influence of the ignition site, the size of the vent and obstacles on the overpressure during an explosion in propane-air mixtures. *Combustion Science and Technology*. 2010; 182(11):1915-1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415
6. Gimranov F.M. Assessment of the consequences of an explosion of household gas. *Industrial and environmental safety*. 2012; 2(64):150-151. (rus).
7. Cheshko I.D., Smirnov A.S., Tumanovsky A.A. Ignition of household gas leaks initiated by electrical emergency modes. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2017; 4(25):77-85. (rus).
8. Korolchenko A.D. New protective structures on buildings of explosive production. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012011
9. Cen K., Tang J.Y., Zhang Yu., Wang F., Zha S.H., Lo M. Assessment of the effectiveness of safety management of indoor gas installations based on SE-DEA. *Storage and Transportation of Oil and Gas*. 2018; 37(5):486-492, 532.
10. Cen K., Song B., Shen R., Zhang Y., Yu W., Wang Q. Dynamic characteristics of a gas explosion and measures to mitigate it inside residential build-

- ings. *Mathematical Problems in Technology*. 2019; 2019:1-15. DOI: 10.1155/2019/2068958
11. Xu Y., Yimiao H., Guowei M. Review of the influence of various factors on gas explosions in underground structures. *Underground Space*. 2019; 5(4):298-314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
  12. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. The expediency of using explosion-proof structures to ensure the explosion resistance of industrial buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
  13. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determining the burst pressure of vent structures with account taken of wind loads. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921 (rus).
  14. Koshiya Yu., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Limits of flammability, explosion pressure and applicability of the Le Chatelier rule to binary mixtures of alkane-nitrous oxide. *Journal of Loss Prevention in the Processing Industry*. 2017; 45:11-19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
  15. Janes A. *Hazard characterization and ATEX explosion risk assessment, contribution to improving the safety of industrial processes*. Perrin, Laurent; University of Lorraine. 2012; 160.
  16. Pan Z., Zhang Z., Yang H., Zhang P., Zhu Yu. Experimental and numerical investigation of flame propagation and transition to detonation in a curved channel. *Aerospace Science and Technology*. 2021; 118:107036. URL: [cience/article/pii/S1270963821005460](https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107036) DOI: 10.1016/j.ast.2021.107036
  17. Yang Z., Zhao K., Song X., Li B., Zhang D., Xie L. The effect of mesh aluminum alloys and the addition of propane on the characteristics of suppressing the explosion of a hydrogen-air mixture. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(70):34998-35013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.035
  18. Kawabata M., Maeda K., Yamanaka M., Nakaoaka T., Kawabata K.S., Aoki K., Anupama G. et al. Intermediate luminosity type Ia supernova 2019muj with narrow absorption lines: long-term radiation associated with a possible bound remnant predicted by the weak deflagration model. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2021; 73(5):1295-1314. DOI: 10.1093/pasj/psab075
  19. Yucel F.S., Habicht F., Arnold F., King R., Bokhon M., Paschereit S.O. Controlled spontaneous ignition in stratified mixtures. *Gorenje i flam*. 2021; 232:111533. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111533
  20. Zou Yu., Li S. Design of the structure and analysis of the characteristics of a foam jet device for pipelines with a high sulfur content mixed with gas-liquid mixtures. *Journal of Science and Technology on Natural Gas*. 2021; 94:104070. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104070
  21. Li S., Kang Yu., Zhang Yu., Lo H. The effect of double holes on the propagation of cracks in PMMA plates under explosive load by caustics. *Theoretical and applied mechanics of destruction*. 2021; 116:103103. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103103
  22. Altunshyk A.S., Onalan F., Suncha F. The influence of the strength of concrete and holes in filling walls on the explosive reaction of RC buildings exposed to TNT explosives. *Iranian Journal of Science and Technology, Proceedings of Civil Engineering*. 2021; 45(4):2525-2554. DOI: 10.1007/s40996-020-00563-x

Поступила 2.11.2022, после доработки 18.11.2022;  
принята к публикации 1.12.2022

Received November 2, 2022; Received in revised form November 18, 2022;

Accepted December 1, 2022

### Информация об авторах

**КОМАРОВ Александр Андреевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus Author ID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

**КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович**, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Москов-

### Information about the authors

**Alexander A. KOMAROV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 155673; Scopus Author ID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

**Dmitriy A. KOROLCHENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),

ский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

**ГРОМОВ Николай Викторович**, канд. техн. наук, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; Scopus Author ID: 57192376754; e-mail: newdayru@bk.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

**Nikolay V. GROMOV**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 550242; Scopus Author ID: 57192376754; e-mail: newdayru@bk.ru

**Contribution of the authors:** *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 6. С. 91–98  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(6):91-98

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.835.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.06.91-98>

## Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях)

Григорий Константинович Ивахнюк, Юнус Юсупович Осмонов ✉

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последнее время происходит увеличение количества многотопливных автозаправочных комплексов (станций), которые предполагают обслуживание и заправку транспортных средств клиентов различными видами моторного топлива. Автозаправочные комплексы (станции) представляют опасность, так как на данных объектах располагаются резервуары с пожароопасным автомобильным топливом, а также оборудование под давлением, в котором находятся взрывоопасные газы. В целях принятия мер по устранению условий возникновения аварий на автозаправочных комплексах необходим сбор и анализ причин возникновения данных происшествий. Цель работы состоит в проведении статистического анализа аварий на автозаправочных станциях (комплексах) для выявления закономерностей возникновения аварий.

**Аналитическая часть.** В работе приведена статистика аварий (пожаров) на автозаправочных комплексах, многотопливных автозаправочных станциях и автомобильных газозаправочных станциях, произошедших на территории Российской Федерации за 10 лет в период с 2012 по 2021 гг., согласно данным, предоставленным Главным управлением «Национальный центр управления в кризисных ситуациях» МЧС России. Приведен анализ возникновения аварий на автозаправочных комплексах с разбивкой по субъектам Российской Федерации. Указаны причины возникновения пожаров, подробно рассмотрены источники зажигания, места возникновения пожаров, расположение объектов. Рассмотрены пожары на автозаправочных станциях с учетом категорирования данных объектов на основании Постановления Правительства «О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора)».

**Заключение.** Статистика, представленная в данной работе, может быть использована в научных работах, связанных с исследованием пожарной опасности автозаправочных комплексов, многотопливных автозаправочных станций и автомобильных газозаправочных станций.

**Ключевые слова:** многотопливная автозаправочная станция; авария; причина пожара; источник зажигания; категория риска

**Для цитирования:** Ивахнюк Г.К., Осмонов Ю.Ю. Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 91–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.91-98.

✉ Осмонов Юнус Юсупович, e-mail: a1ktn@yandex.ru

## Statistical analysis of accidents at filling stations

Grigoriy K. Ivakhnyuk, Yunus Yu. Osmonov ✉

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The number of accidents at gas stations has increased lately. Gas stations provide maintenance and fueling services. Gas stations are dangerous because they store fire hazardous automobile fuel, as well as equipment under pressure that may contain explosive gases. For safety reasons, it is necessary to analyze the causes of these accidents. The purpose of the work is to conduct a statistical analysis of accidents at gas stations to identify patterns of accidents.

**Analysis.** The article presents the statistics of accidents at service gas stations in the Russian Federation for 10 years from 2012 to 2021. The data is provided by the National Crisis Management Centre of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Emercom of Russia). The analysis of accidents at gas stations is broken down by the constituent entities of the Rus-

sian Federation. Causes of fires are indicated; ignition sources are considered, locations of fires and facilities are listed. Fires at gas stations were considered taking into account the categorization of objects in accordance with government decree "On Application of a Risk-Oriented Approach to Organization of Certain Types of State Control (Supervision)".

**Conclusion.** The statistics, provided and analyzed in the article, can serve as the basis for a scientific research project on the fire safety of gas stations.

**Keywords:** multi-fuel petrol station; disaster; cause of the fire; ignition source; risk category

**For citation:** Ivakhnyuk G.K., Osmonov Yu.Yu. Statistical analysis of accidents at filling stations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):91-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.91-98 (rus).

✉ Yunus Yusupovich Osmonov, e-mail: a1ktn@yandex.ru

## Введение

С учетом высокого роста количества автомобильного транспорта у населения [1, 2] появилась необходимость в развитии имущественных комплексов, объединяющих в себе такие объекты, как автозаправочная станции, объекты, предназначенные для обслуживания транспортных средств, водителей и пассажиров. В соответствии с ГОСТ Р 58404–2019 данный объект носит название автозаправочный комплекс. Автозаправочные комплексы представляют потенциальную опасность, так как на данных объектах располагаются резервуары, в которых находится пожароопасное автомобильное топливо, а также оборудование под давлением, в котором обращаются взрывоопасные газы [3]. При эксплуатации автозаправочных станций и комплексов в современных условиях появляется риск возникновения чрезвычайной ситуации, которая может повлечь за собой большие по численности человеческие жертвы, массовый ущерб здоровью людей и (или) окружающей среде, значительные материальные потери [4].

Исследование статистической информации является неотъемлемой частью научных исследований, что подтверждается рядом научных работ [5–8]. Статистический анализ позволяет выявлять тенденции и принимать меры корректирующей направленности [9–12]. В целях принятия мер по устранению условий возникновения аварий на автозаправочных комплексах (станциях) необходим сбор и анализ причин возникновения данных происшествий, что подтверждается научными исследованиями зарубежных специалистов [13–15].

Цель работы состоит в проведении статистического анализа аварий на автозаправочных станциях (комплексах) для выявления закономерностей возникновения аварий.

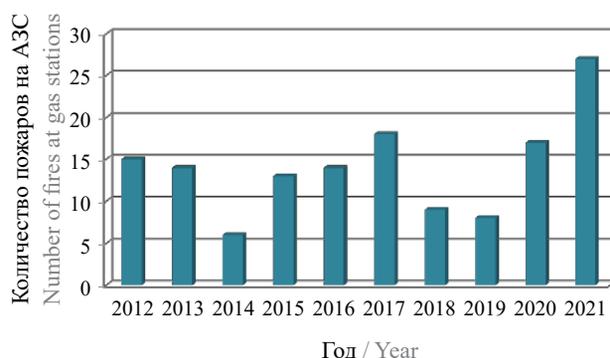
## Аналитическая часть

За 10 лет, в период с 2012 по 2021 гг., согласно данным, предоставленным Главным управлением «Национальный центр управления в кризисных ситуациях» МЧС России, официально зарегистрирован 141 пожар на автозаправочных комплексах (стан-

циях), в результате которых пострадало 85 человек, в том числе 3 детей, спасено 78 человек, к сожалению, погибло 2 человека. Прямой ущерб от пожаров составил 26,1 млн рублей. На рис. 1 представлен график распределения аварий по годам. Результаты статистики говорят о том, что частота возникновения аварий на данных объектах показывает огромный рост по сравнению с предыдущими десятилетиями. Так, например, за 30 лет в период с 1960 по 1990 гг. произошло всего 68 пожаров [16], что в два раза меньше, чем за последнее десятилетие.

За рассматриваемый период произошли две крупные аварии на автозаправочных станциях, попавшие под критерий чрезвычайной ситуации. 18 марта 2016 г. в городе Кизляр Республики Дагестан при перекачке сжиженного газа с автоцистерны автомобиля «МАН» в подземное хранилище автозаправочной станции «Импульс» произошел взрыв с последующим возгоранием на площади 400 м<sup>2</sup>, в результате чего 17 человек получили травмы различной степени тяжести. Вторая крупная авария произошла 10 августа 2020 г. в городе Волгограде, там взорвалась автоцистерна с пропаном на территории автомобильной газозаправочной станции «Газпром» с последующим переходом пожара на здание заправочной станции, площадь возгорания составила 350 м<sup>2</sup>, пострадало 13 человек, 1 погиб.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения количества пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) по субъектам Российской



**Рис. 1.** Распределение аварий на автозаправочных комплексах (станциях) за период с 2012 по 2021 гг.

**Fig. 1.** Breakdown of accidents at gas stations from 2012 to 2021

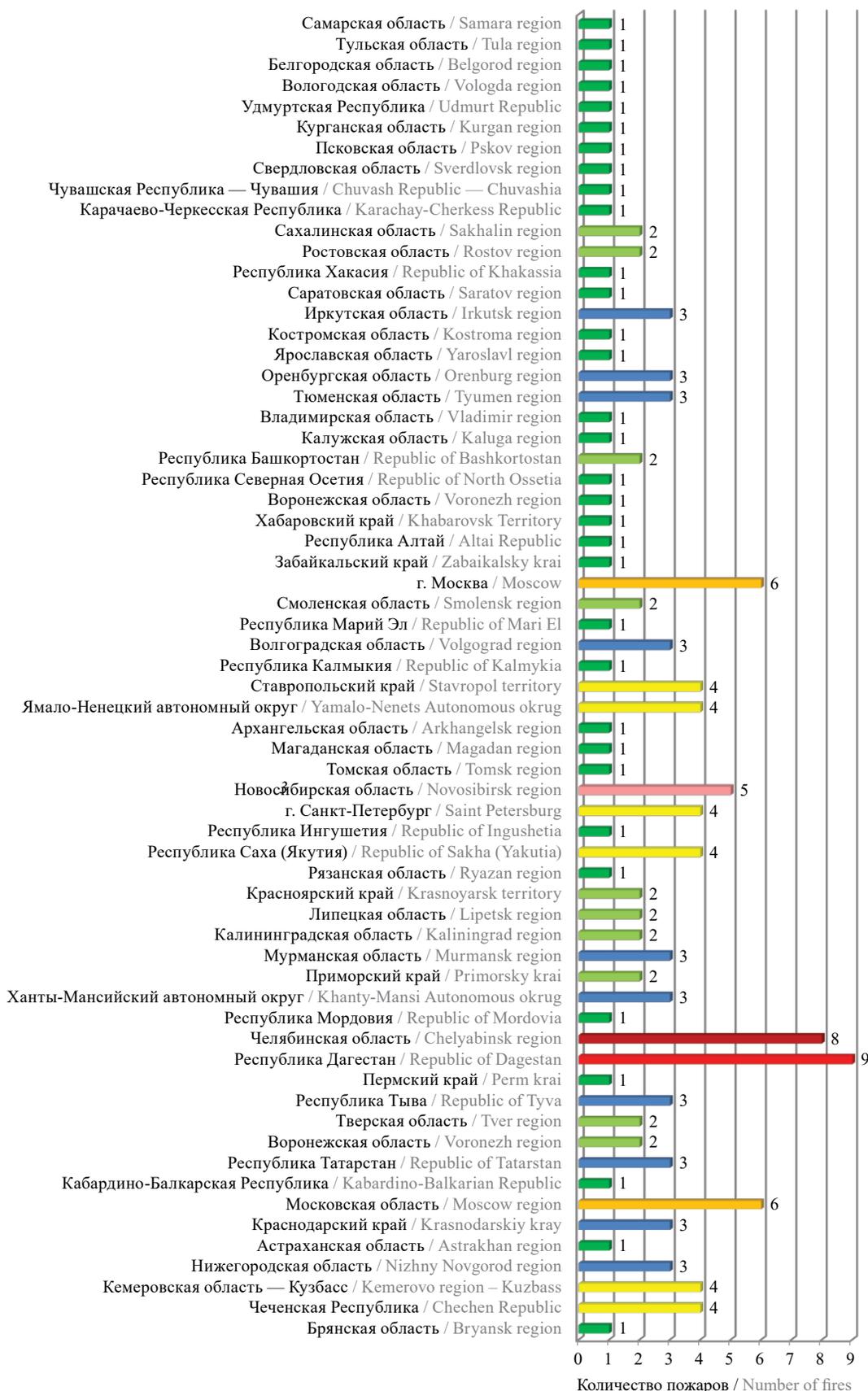


Рис. 2. Гистограмма распределения количества пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) по субъектам Российской Федерации с 2012 по 2021 гг.

Fig. 2. Histogram showing the breakdown of the number of fires at gas stations in the constituent entities of the Russian Federation from 2012 to 2021

Федерации с 2012 по 2021 гг. По гистограмме видно, что наибольшее количество пожаров на АЗС за рассматриваемый период произошло в Республике Дагестан (9 пожаров) и Челябинской области (8 пожаров). В субъектах Российской Федерации с низкой плотностью населения, согласно представленным статистическим данным, за 10 лет произошло по 1 аварии на АЗС, или не произошло совсем. С увеличением плотности населения субъекта количество аварий возрастает, так, например, в Москве и Московской области произошло по 6 аварий, что выше среднего значения.

Причинами пожаров на АЗС за рассматриваемый период являлись:

- поджог (14 случаев);
- нарушение правил эксплуатации электрооборудования (36 случаев);
- неосторожное обращение с огнем (11 случаев);
- разрушение движущихся узлов, деталей, попадание в движущиеся механизмы посторонних предметов (2 случая);
- нарушение технологического регламента процесса производства (4 случая);
- нарушение правил монтажа электрооборудования (4 случая);
- разряд статического электричества (8 случаев);
- неисправность систем, механизмов и узлов транспортного средства (1 случай);
- нарушение правил пожарной безопасности при эксплуатации теплогенерирующих агрегатов и устройств (1 случай);
- нарушение правил пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ (6 случаев);
- недостаток конструкции и изготовления электрооборудования (11 случаев);
- неосторожность при курении (1 случай);
- причины, связанные с нарушением правил установки и эксплуатации газового оборудования (4 случая);
- шалость с огнем детей (1 случай);
- неисправность, отсутствие искрогасительных устройств (1 случай);
- нарушение правил пожарной безопасности при проведении огневых работ (отогревание труб, двигателей и пр.) (2 случая);
- нарушение правил эксплуатации бытовых керосиновых, бензиновых и других устройств (1 случай);
- самовозгорание веществ и материалов (1 случай).

Источниками зажигания пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) за рассматриваемый период являлись: электрораспределительный щит (электросчетчик), кабель (провод), спички, зажигалка, свеча, выключатель, вилка, электрическая розетка, разветвитель, сигарета, детали, узлы,

механизмы, системы транспортного средства, кондиционер, холодильник, бытовые нагревательные приборы, электроинструмент, газосварочный (электрогазосварочный) аппарат, электродвигатель, нагревательный, осветительный прибор на жидком топливе, самовозгорание травы или мусора, масляная ветошь, система совершения заправки многоэлементных газовых контейнеров. На рис. 3 представлена диаграмма основных причин возникновения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях).

По результатам анализа причин возникновения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) за рассматриваемый период самой распространенной причиной является нарушение правил эксплуатации электрооборудования (36 случаев), также распространены такие причины, как умышленный поджог (14 случаев), неосторожное обращение с огнем (11 случаев) и недостаток изготовления электрооборудования (11 случаев).

Анализ мест возникновения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) за рассматриваемый период показывает, что наиболее встречающимся местом возникновения пожара на автозаправочных комплексах (станциях) являются резервуары и наружные технологические установки. На рис. 4 представлена диаграмма распределения мест возникновения пожаров.

На рис. 5 представлена диаграмма распределения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) по месту расположения, здесь видно, что наибольшее количество пожаров возникло на автозаправочных комплексах (станциях), расположенных в городах (84 пожара), меньше всего в населенных пунктах городского типа (11 пожаров).

В 2016 г. было официально опубликовано Постановление Правительства РФ от 17.08.2016 № 806 (ред. от 22.07.2017) «О применении риск-ориентированного подхода при организации

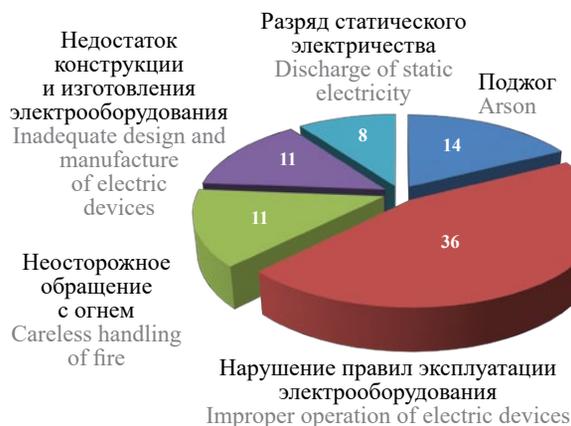


Рис. 3. Основные причины возникновения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) с 2012 по 2021 гг.

Fig. 3. The main causes of fires at gas stations from 2012 to 2021

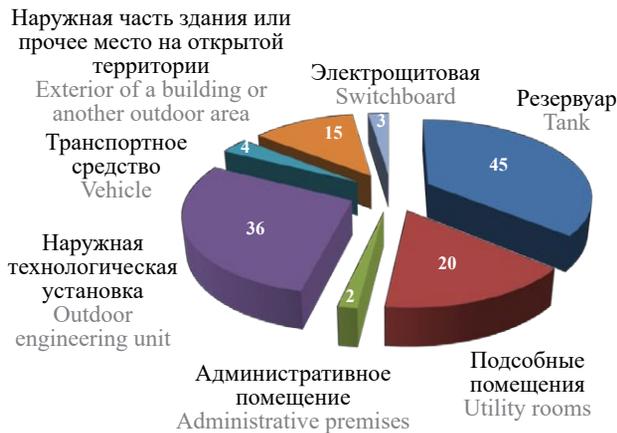


Рис. 4. Места возникновения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) с 2012 по 2021 гг.

Fig. 4. Locations of fires at gas stations from 2012 to 2021

отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». В соответствии с данным нормативно-правовым актом, Федеральный государственный пожарный надзор (ГПН) является одним из видов государственного контроля (надзора), которые осуществляются с применением риск-ориентированного подхода, а объекты надзора категоризируются на шесть категорий опасности в соответствии с критериями тяжести потенциальных негативных последствий возможного несоблюдения на объекте защиты обязательных требований. В зависимости от отнесения объекта к определенной категории риска определяется периодичность осуществления мероприятий по контролю.

Применение риск-ориентированного подхода при планировании мероприятий по контролю в области пожарной безопасности на автомобильных газозаправочных станциях подробно рассмотрено в работах [17, 18]. Активные исследования в области риск-ориентированной контрольно-надзорной деятельности за рубежом последовали после отчета британского экономиста Ф. Хэмптона, посвященного необходимости и методам снижения административных барьеров [19]. Данный отчет был опубликован в 2005 г. На основании этого доклада в работе профессора Лондонской школы экономики была предложена модель риск-ориентированного подхода [20], заключающаяся в том, что большее внимание необходимо уделять тем рискам, которые могут быть уменьшены, а не требованиям правил, которые должны быть выполнены.

На рис. 6 представлен график распределения пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) с 2017 по 2021 гг., в зависимости от категории риска, определенной в соответствии с Критери-

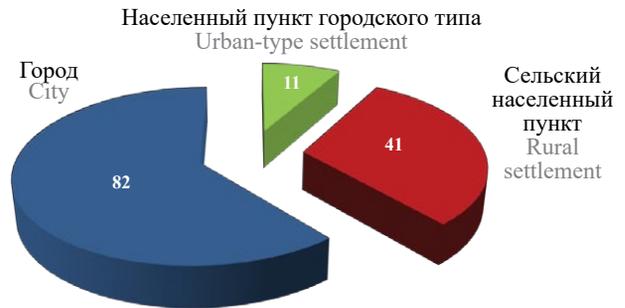


Рис. 5. Расположение автозаправочных комплексов (станций), на которых возникли пожары в период с 2012 по 2021 гг.

Fig. 5. Location of gas stations where fires occurred in the period from 2012 to 2021

ями отнесения объектов защиты к определенной категории риска, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 12.04.2012 № 290 «О Федеральном государственном пожарном надзоре». Наибольшее количество пожаров произошло на объектах среднего риска (4 класса). В соответствии с Положением о Федеральном государственном пожарном надзоре, на объектах, отнесенных к данной категории риска, плановая проверка проводится не чаще одного раза в период, предусмотренный положением о виде государственного контроля (надзора), т.е. не чаще чем один раз в 5 лет.

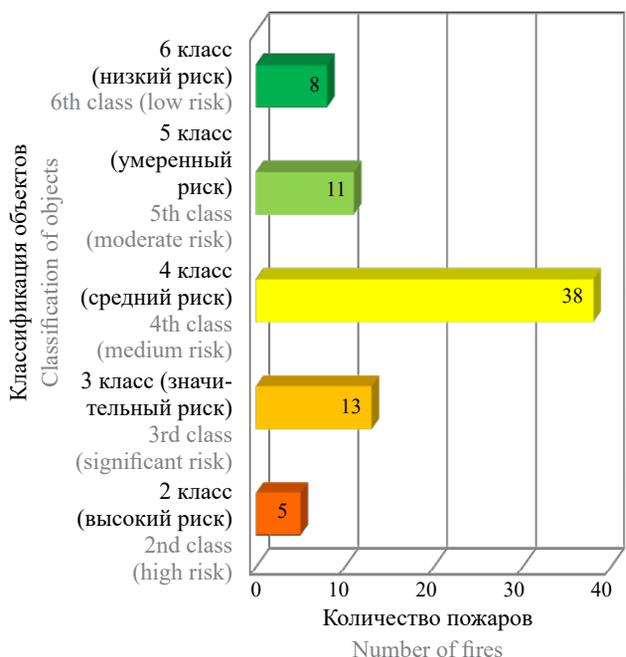


Рис. 6. Распределение пожаров на автозаправочных комплексах (станциях) с 2017 по 2021 гг. в зависимости от категории риска

Fig. 6. Breakdown of fires at filling stations from 2017 to 2021, depending on the risk category

В период с 2017 по 2021 г., т.е. с момента принятия Постановления Правительства «О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора)» на пожарах, произошедших на автозаправочных комплексах (станциях), погибло 2 человека на объектах низкого риска 6 класса.

Травмы различной степени тяжести получили 58 человек, из них:

- 42 человека на объектах высокого риска (2 класс);
- 5 человек на объектах значительного риска (3 класс);
- 11 человек на объектах среднего риска (4 класс).

Стоит отметить, что наибольшее количество пострадавших (42 человека) зарегистрировано в одном пожаре на автомобильной газозаправочной станции «ЕвроГаз», случившемся 14 июня 2021 г. в городе Новосибирске, где пламя горящего газа поднялось в небо на высоту около 140 м. Мощному взрыву предшествовал пожар, возникший во время проведения работ по перекачке сжиженного газа из автоцистерны в резервуар, находящийся на автомобильной газозаправочной станции.

## Выводы

В результате проведенной работы по анализу статистической информации возникновения аварий (пожаров) на автомобильных заправочных станциях (комплексах) были выявлены закономерности возникновения аварий (пожаров):

- наиболее распространенной причиной пожаров является нарушение правил эксплуатации электрооборудования, наименее распространенная причина — разряд статического электричества;
- наиболее встречающееся место возникновения пожара — резервуары и наружные технологические установки, наименее встречающееся — административное помещение;
- наибольшее количество пожаров произошло на автозаправочных станциях (комплексах), находящихся в городе, наименьшее — в населенных пунктах городского типа;
- наибольшее количество пожаров произошло на автозаправочных станциях (комплексах) среднего риска, наименьшее — на объектах высокого риска.

Материалы, представленные в данной работе, могут послужить основой для научных работ, связанных с исследованием пожарной опасности автозаправочных комплексов, многотопливных автозаправочных станций и автомобильных газозаправочных станций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкина А.А. Рост количества автомобильного транспорта как угроза экологической безопасности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 178–181. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42842506>
2. Терентьев В.В. Безопасность автомобильных перевозок: проблемы и решения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2017. Т. 1. С. 133–135. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29852209>
3. Лей В.А. Условия обеспечения безопасности на автозаправочных комплексах // Modern Science. 2021. № 2–2. С. 372–375. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44789463>
4. Аксенов А.А., Аксенова Е.И., Баранов А.А. Проблемы обеспечения пожарной безопасности на автомобильных газозаправочных станциях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 1 (57). С. 21–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46139277>
5. Корчагина О.М. Роль статистики в управлении // ИнноЦентр. 2015. № 4. С. 33–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28843626>
6. Овчаров А.О. О роли статистической методологии в научных исследованиях // Вопросы статистики. 2014. № 4. С. 27–31. DOI: 10.34023/2313-6383-2014-0-4-27-31 URL: <https://voprstat.elpub.ru/jour/article/view/76>
7. McPherson G. Statistics in scientific investigation: its basis, application, and interpretation. Springer Science & Business Media, 2013. 667 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-4290-9
8. Dowdy S., Wearden S., Chilko D. Statistics for research. John Wiley & Sons, 2011. 634 p.
9. Дьяконов Д.Р., Филимонова Е.В. Роль статистики в научных и педагогических исследованиях // Статистический анализ социально-экономического развития федеральных округов Российской Федерации: опыт, реалии, перспективы : мат. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 10-летию образования. Ставрополь, 7–8 апреля 2020 г. Ставрополь, 2020. С. 291–292. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44354501>
10. Omidvari M., Mansouri N., Nouri J. A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories // Safety Science. 2015. Vol. 73. Pp. 34–42. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.11.003

11. Wang L., Li W., Feng W., Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology // *Building and Environment*. 2021. Vol. 205. Pp. 180–188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
12. Lee S. Quantitative risk assessment of fire & explosion for regasification process of an LNG-FSRU // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 197. Pp. 106–115.
13. Chen K., Ye J., Zhang X., Lv Q. Fire and explosion analysis of filling station based on fuzzy mathematics and Bayesian network model // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 261. P. 03055. DOI: 10.1051/e3sconf/202126103055
14. Ono R. The challenges of getting a national fire statistic system in Brazil // *Fire Science and Technology*. 2012. Vol. 31. Issue 3. Pp. 77–85. DOI: 10.3210/fst.31.77
15. Gulyamova G.M. et al. About methods of decrease in fire hazard at gas stations // *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019. Vol. 1. Issue 1 (31). Pp. 8–10. DOI: 10.31435/rsglobal\_wos/31012019/6306
16. Гордиенко Д.М. Оценка пожарного риска автозаправочных станций и разработка способов его снижения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 175 с.
17. Фомин А.В. и др. Проблемы применения риск-ориентированного подхода к планированию мероприятий по контролю в области пожарной безопасности на автомобильных газозаправочных станциях // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. 2016. № 3. С. 33–39.
18. Шахманов Ф.Ф. Риск-ориентированный метод осуществления пожарного надзора автомобильных газозаправочных станций : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 115 с.
19. Hampton P. Reducing administrative burdens: effective inspection and enforcement. London : HM Treasury, 2005. 140 p.
20. Black J. Risk-based regulation: choices, practices and lessons being learnt // *Risk and regulatory policy. Improving the governance of risk*. Paris : OECD Publishing, 2010.

## REFERENCES

1. Shishkina A.A. Growth of number of car vehicles as a threat to environmental safety. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2020; 3:178-181. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42842506> (rus).
2. Terentyev V.V. Road transport safety: problems and solutions. *Proceedings of the international symposium "Reliability and quality"*. 2017; 1:133-135. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29852209> (rus).
3. Lei V.A. Safety conditions at gas stations. *Modern Science*. 2021; 2-2:372-375. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44789463> (rus).
4. Aksenov A.A. Problems of ensuring fire safety at automobile petrol station. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2021; 1(57):21-26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46139277> (rus).
5. Korchagina O.M. Statistics role in management. *Inno-Centr*. 2015; 4(9):33-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28843626> (rus).
6. Ovcharov A.O. Revisiting the role of statistical methodology in scientific research. *Voprosy Statistiki*. 2014; 4:27-31. URL: <https://voprstat.elpub.ru/jour/article/view/76> (rus).
7. McPherson G. *Statistics in scientific investigation: its basis, application, and interpretation*. Springer Science & Business Media, 2013; 667. DOI: 10.1007/978-1-4757-4290-9
8. Dowdy S., Wearden S., Chilko D. *Statistics for research*. John Wiley & Sons, 2011; 634.
9. Dyakonov D.R., Filimonova E.V. The role of statistics in scientific and pedagogical research. *Statistical analysis of the socio-economic development of federal districts of the Russian Federation: experience, realities, prospects : materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 10th anniversary of education. Stavropol, 7-8 April 2020*. Stavropol, 2020; 291-292. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44354501> (rus).
10. Omidvari M., Mansouri N., Nouri J. A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories. *Safety Science*. 2015; 73:34-42. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.11.003
11. Wang L., Li W., Feng W., Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology. *Building and Environment*. 2021; 205:180-188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
12. Lee S. Quantitative risk assessment of fire & explosion for regasification process of an LNG-FSRU. *Ocean Engineering*. 2020; 197:106-115.
13. Chen K., Ye J., Zhang X., Lv Q. Fire and explosion analysis of filling station based on fuzzy mathematics and Bayesian network model. *E3S Web of Conferences*. 2021; 261:03055. DOI: 10.1051/e3sconf/202126103055
14. Ono R. The challenges of getting a national fire statistic system in Brazil. *Fire Science and Technology*. 2012; 31(3):77-85. DOI: 10.3210/fst.31.77
15. Gulyamova G.M., Aripkhodzhayeva M.B., Nizomova D.O., Rakhmatova D.M. About methods of decrease in fire hazard at gas stations. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019; 1(1):8-10. DOI: 10.31435/rsglobal\_wos/31012019/6306
16. Gordienko D.M. *Fire risk assessment of gas stations and development of ways to reduce : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2001; 175.
17. Fomin A.V. Problems of application of a risk-based approach to planning control measures for fire safety at gas stations. *Scientific and analytical journal "Bulletin*

- of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2016; 3:33-39.
18. Shakhmanov F.F. *Risk-oriented method of fire supervision of automobile gas stations : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Saint-Petersburg, 2018; 115.
  19. Hampton P. *Reducing administrative burdens: effective inspection and enforcement*. London, HM Treasury, 2005; 140.
  20. Black J. Risk-based regulation: choices, practices and lessons being learnt. *Risk and regulatory policy. Improving the governance of risk*. Paris, OECD Publishing. 2010.

*Поступила 28.09.2022, после доработки 28.10.2022;  
принята к публикации 07.11.2022*

*Received September 28, 2022; Received in revised form October 28, 2022;  
Accepted November 7, 2022*

### Информация об авторах

**ИВАХНИЮК Григорий Константинович**, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 521920; ORCID: 0000-0003-2556-303X; e-mail: fireside@mail.ru

**ОСМОНОВ Юнус Юсупович**, соискатель кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 000-0002-8109-0495; e-mail: a1ktn@yandex.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors

**Grigory K. IVAKHNYUK**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions, Saint-Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moscow Ave., 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 521920; ORCID: 0000-0003-2556-303X; e-mail: fireside@mail.ru

**Yunus Yu. OSMONOV**, Candidate of the Department of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Saint-Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moscow Ave., 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 000-0002-8109-0495; e-mail: a1ktn@yandex.ru

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

*The authors declare no conflicts of interests.*

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2022 г.

### А

- Абашкин А.А. см. Присадков В.И.  
 Абашкин А.А. см. Хасанов И.Р.  
 Абдеев Б.М. см. Недобитков А.И.  
 Акперов Р.Г. см. Пузач С.В.  
 Алешков М.В., Двоенко О.В., Гумиров А.С., Соковнин А.И., Серегин М.В., Семенюк И.О., Цариченко С.Г. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях, № 4, 65  
 Алешков М.В., Молчанов В.П., Макаров С.А., Иошенко Д.А., Третьяков А.В., Барешкин В.В., Битуев Р.Б. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа, № 5, 67  
 Антонов С.П. см. Гаращенко А.Н.  
 Асеева Р.М. см. Кобелев А.А.

### Б

- Балабанов И.Д. см. Танклевский Л.Т.  
 Барановский Н.В., Вяткина В.А. Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи, № 3, 34  
 Барешкин В.В. см. Алешков М.В.  
 Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа, № 5, 26  
 Беззапонная О.В. см. Головина Е.В.  
 Битуев Р.Б. см. Алешков М.В.  
 Бондар А.И. см. Танклевский Л.Т.  
 Бороденко А.Н. см. Липленко М.А.  
 Булгакова А.А. см. Константинова Н.И.

### В

- Виноградов А.В. см. Гаращенко А.Н.  
 Вяткина В.А. см. Барановский Н.В.

### Г

- Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия, № 6, 13

Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С. Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключаящих взрывообразную потерю целостности бетона и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций, № 3, 45

Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В. Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тьюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости, № 1, 21

Гвоздев Е.В. Об оценке состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России, № 1, 49

Гвоздев Е.В. Рационально-целевое развитие системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России, № 6, 47

Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., Комиссаров А.А., Тихонов С.М. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах, № 2, 52

Головина Е.В., Калач А.В., Беззапонная О.В., Крутолапов А.С., Шарапов С.В. Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов, № 3, 24

Гомозов А.В. см. Пехотиков А.В.

Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения — современные технологии пожаротушения с российским приоритетом, № 5, 54

Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе, № 2, 41

Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении, № 3, 12

Громов Н.В. см. Комаров А.А.

Гумиров А.С. см. Алешков М.В.

### Д

Данилов А.И. см. Гаращенко А.Н.

Двоенко О.В. см. Алешков М.В.

### Е

Еремина Т.Ю. см. Корольченко Д.А.

Еремина Т.Ю. см. Пузач С.В.

## 3

- Зубань А.В.** см. Константинова Н.И.  
**Зуева А.С.** см. Хасанов И.Р.  
**Зуев С.А.** см. Хасанов И.Р.  
**Зыков В.И.** см. Пузач С.В.

## И

- Ивахнюк Г.К., Осмонов Ю.Ю.** Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях), № 6, 91  
**Ивашук Р.А.** см. Пехотиков А.В.  
**Ищенко Д.А.** см. Алешков М.В.  
**Истратов Р.Н.** см. Самошин Д.А.

## К

- Калач А.В.** см. Головина Е.В.  
**Калмыков С.П.** Влияние размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара, № 4, 56  
**Кобелев А.А., Нагановский Ю.К., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Шапихов Е.М.** Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры, № 4, 5  
**Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В.** Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий, № 6, 78  
**Комиссаров А.А.** см. Голованов В.И.  
**Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А.** Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов, № 2, 22  
**Константинова Н.И.** см. Присадков В.И.  
**Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А.** Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде), № 6, 30  
**Корольченко А.Д.** см. Горев В.А.  
**Корольченко Д.А.** см. Комаров А.А.  
**Кочетыгов В.А.** см. Самошин Д.А.  
**Круглов Е.Ю.** см. Кобелев А.А.  
**Крутолапов А.С.** см. Головина Е.В.  
**Крючков А.В.** см. Самарин И.В.  
**Крючков Г.И.** см. Голованов В.И.

## Л

- Лебедченко О.С.** см. Пузач С.В.

**Липленко М.А., Бороденко А.Н., Мосолов Г.В.** Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей, № 1, 88

**Ложкин В.Н.** Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов, № 3, 65

**Лучкин С.А.** см. Пехотиков А.В.

## М

- Макаров С.А.** см. Алешков М.В.  
**Марченкова С.В.** см. Гаращенко А.Н.  
**Молчанов В.П.** см. Алешков М.В.  
**Мосолов Г.В.** см. Липленко М.А.  
**Мусликова С.В.** см. Присадков В.И.

## Н

- Нагановский Ю.К.** см. Кобелев А.А.  
**Назаров В.П.** см. Ширяев Е.В.  
**Недобитков А.И., Абдеев Б.М.** Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров, № 1, 65  
**Немчинов С.Г., Цариченко С.Г.** Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса, № 2, 63  
**Новиков Н.С.** см. Гаращенко А.Н.

## О

- Осмонов Ю.Ю.** см. Ивахнюк Г.К.

## П

- Павлов В.В.** см. Гаращенко А.Н.  
**Парфененко А.П., Тимофеев А.Б.** Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ, № 6, 68  
**Пехотиков А.В., Ивашук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А.** Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре, № 3, 84  
**Пехотиков А.В., Полетаев А.Н., Гомозов А.В., Усолкин С.В.** Современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций, № 2, 5  
**Полетаев Н.Л.** Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м<sup>3</sup> камере, № 5, 6  
**Полетаев Н.Л.** Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м<sup>3</sup> камере от дисперсности частиц, № 6, 6

**Полетаев Н.Л.** Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки, № 1, 14

**Полетаев Н.Л.** Об оценке взрывоопасности ядерного графита в 1-м<sup>3</sup> камере, № 2, 15

**Полетаев Н.Л.** Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа, № 3, 5

**Полетаев А.Н.** см. Пехотиков А.В.

**Портнов Ф.А.** см. Корольченко Д.А.

**Портнов Ф.А.** см. Пузач С.В.

**Присадков В.И., Константинова Н.И., Мусликова С.В., Абашкин А.А.** Классификация гостиниц с учетом пожарных рисков, № 3, 75

**Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А.** Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции, № 5, 33

**Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Чистяков Т.И.** Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки, № 6, 56

**Пузач С.В.** см. Корольченко Д.А.

**Пузач С.В., Черепанов Р.А., Акперов Р.Г.** Сравнительная оценка критериев определения критических величин парциальной плотности монооксида углерода при расчете времени блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении, № 1, 6

## С

**Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.** Подход к моделированию технического обслуживания стационарных термохимических газосигнализаторов на установках НПЗ, № 1, 40

**Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.** Расчет регламентированного количества выносных датчиков газосигнализаторов вокруг открытых установок нефтеперерабатывающих заводов прямоугольной формы, № 2, 33

**Самошин Д.А., Истратов Р.Н., Шаранова М.М., Кочетыгов В.А., Томин С.В., Фролов А.Г.** Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре, № 4, 38

**Семенюк И.О.** см. Алешков М.В.

**Серегин М.В.** см. Алешков М.В.

**Соковнин А.И.** см. Алешков М.В.

**Стрекалев А.Н.** см. Голованов В.И.

**Строгонов А.Ю.** см. Самарин И.В.

## Т

**Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бондар А.И., Балабанов И.Д.** Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара, № 5, 43

**Таранцев А.А.** см. Танклевский Л.Т.

**Тимофеев А.Б.** см. Парфененко А.П.

**Тихонов С.М.** см. Голованов В.И.

**Томин С.В.** см. Самошин Д.А.

**Третьяков А.В.** см. Алешков М.В.

## У

**Усолкин С.В.** см. Пехотиков А.В.

## Ф

**Фролов А.Г.** см. Самошин Д.А.

## Х

**Харламенков А.С.** Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2, № 1, 99

**Харламенков А.С.** Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России, № 3, 96

**Харламенков А.С.** Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1, № 4, 76

**Харламенков А.С.** Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2, № 5, 83

**Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абашкин А.А., Зуева А.С.** Распространение пожара из открытой автостоянки, расположенной на первом этаже жилого здания, № 1, 77

## Ц

**Цариченко С.Г.** см. Алешков М.В.

**Цариченко С.Г.** см. Горбань Ю.И.

**Цариченко С.Г.** см. Немчинов С.Г.

## Ч

**Черепанов Р.А.** см. Пузач С.В.

**Чистяков Т.И.** см. Пузач С.В.

## Ш

**Шангараев Р.Р.** Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, № 4, 16

**Шапихов Е.М.** см. Кобелев А.А.

**Шарапов С.В.** см. Головина Е.В.

**Шебеко Ю.Н.** см. Гордиенко Д.М.

**Ширяев Е.В., Назаров В.П.** Снижение испарения углеродородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла, № 5, 14

# ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2022 г.

| Фамилии авторов и названия статей  | Номер<br>журнала | Стр.  |
|--|------------------|-------|
| <b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</b>  |                  |       |
| Пехотиков А.В., Полетаев А.Н., Гомозов А.В., Усолкин С.В. Современные требования к проектированию систем противопожарной защиты образовательных организаций . . . . .  | 2                | 5–14  |
| <b>ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА</b>  |                  |       |
| Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении . . . . .   | 3                | 12–23 |
| Полетаев Н.Л. Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м <sup>3</sup> камере   | 5                | 6–13  |
| Полетаев Н.Л. Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м <sup>3</sup> камере от дисперсности частиц . . . . .  | 6                | 6–12  |
| Полетаев Н.Л. Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки . . . . .   | 1                | 14–20 |
| Полетаев Н.Л. Об оценке взрывоопасности ядерного графита в 1-м <sup>3</sup> камере . . . . .   | 2                | 15–21 |
| Полетаев Н.Л. Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа . .  | 3                | 5–11  |
| Пузач С.В., Черепанов Р.А., Акперов Р.Г. Сравнительная оценка критериев определения критических величин парциальной плотности монооксида углерода при расчете времени блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении . . . . .                                      | 1                | 6–13  |
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ</b>   |                  |       |
| Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа . . . . .  | 5                | 26–32 |
| Гарашенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия . . . . .           | 6                | 13–29 |
| Гарашенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В. Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости . . . . . | 1                | 21–39 |
| Головина Е.В., Калач А.В., Беззапонная О.В., Крутолапов А.С., Шарапов С.В. Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов . . . . .   | 3                | 24–33 |
| Кобелев А.А., Нагановский Ю.К., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Шапихов Е.М. Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры . . . . .  | 4                | 5–15  |
| Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А. Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрацев . . . . .   | 2                | 22–32 |
| Ширяев Е.В., Назаров В.П. Снижение испарения углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла . . . . .   | 5                | 14–25 |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,<br/>ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ</b>   |                  |       |
| Барановский Н.В., Вяткина В.А. Математическое моделирование процессов инертного прогрева и пиролиза элемента лесного горючего материала при воздействии фронта лесного пожара с учетом процесса образования сажи . . . . .   | 3                | 34–44 |

| Фамилии авторов и названия статей  | Номер<br>журнала | Стр.  |
|--|------------------|-------|
| <b>Гвоздев Е.В.</b> Об оценке состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России . . . . .  | 1                | 49–64 |
| <b>Гвоздев Е.В.</b> Рационально-целое развитие системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России. . . . .  | 6                | 47–55 |
| <b>Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А.</b> Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) . . . . .   | 6                | 30–46 |
| <b>Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.</b> Подход к моделированию технического обслуживания стационарных термохимических газосигнализаторов на установках НПЗ . . . . .   | 1                | 40–48 |
| <b>Шангараев Р.Р.</b> Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами . . . . .  | 4                | 16–26 |
| <b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА</b>  |                  |       |
| <b>Недобитков А.И., Абдеев Б.М.</b> Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров . . . . .  | 1                | 65–76 |
| <b>Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Чистяков Т.И.</b> Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки . . . . .  | 6                | 56–67 |
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ</b>   |                  |       |
| <b>Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.</b> Расчет регламентированного количества выносных датчиков газосигнализаторов вокруг открытых установок нефтеперерабатывающих заводов прямоугольной формы . . . . .   | 2                | 33–40 |
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ</b>   |                  |       |
| <b>Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С.</b> Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности бетона и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций . . . . . | 3                | 45–64 |
| <b>Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., Комиссаров А.А., Тихонов С.М.</b> Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах. . . . .   | 2                | 52–62 |
| <b>Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н.</b> Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе . . . . .  | 2                | 41–51 |
| <b>Земский Г.Т., Вогман Л.П., Кондратюк Н.В., Корольченко Д.А.</b> Анализ методов определения коэффициента участия горючих газов и паров во взрыве при установлении категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности . . . . .   | 4                | 27–37 |
| <b>Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В.</b> Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий . . . . .  | 6                | 78–90 |
| <b>Липленко М.А., Бороденко А.Н., Мосолов Г.В.</b> Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей . . . . .   | 1                | 88–98 |
| <b>Ложкин В.Н.</b> Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов . . . . .   | 3                | 65–74 |
| <b>Парфененко А.П., Тимофеев А.Б.</b> Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ . . . . .  | 6                | 68–77 |
| <b>Присадков В.И., Константинова Н.И., Мусликова С.В., Абашкин А.А.</b> Классификация гостиниц с учетом пожарных рисков . . . . .  | 3                | 75–83 |
| <b>Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А.</b> Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции . . . . .  | 5                | 33–42 |

| Фамилии авторов и названия статей   | Номер<br>журнала | Стр.   |
|---|------------------|--------|
| Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абашкин А.А., Зуева А.С. Распространение пожара из открытой автостоянки, расположенной на первом этаже жилого здания . . . . .   | 1                | 77–87  |
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ</b>   |                  |        |
| Калмыков С.П. Влияние размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара . . . . .   | 4                | 56–64  |
| Пехотиков А.В., Иващук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре . . .   | 3                | 84–95  |
| Самошин Д.А., Истратов Р.Н., Шаранова М.М., Кочетыгов В.А., Томин С.В., Фролов А.Г. Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре . . . . .                                   | 4                | 38–55  |
| <b>СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ</b>  |                  |        |
| Ивахнюк Г.К., Осмонов Ю.Ю. Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях) . . . . .  | 6                | 91–98  |
| <b>АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА</b>  |                  |        |
| Алешков М.В., Двоенко О.В., Гумиров А.С., Соковнин А.И., Серегин М.В., Семенюк И.О., Цариченко С.Г. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях. . . . .  | 4                | 65–75  |
| Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения — современные технологии пожаротушения с российским приоритетом. . . . .  | 5                | 54–66  |
| Немчинов С.Г., Цариченко С.Г. Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса . . . . .               | 2                | 63–70  |
| Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бондар А.И., Балабанов И.Д. Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара . . . . .   | 5                | 43–53  |
| <b>СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ</b>   |                  |        |
| Алешков М.В., Молчанов В.П., Макаров С.А., Иощенко Д.А., Третьяков А.В., Барешкин В.В., Битуев Р.Б. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа . . . . . | 5                | 67–82  |
| <b>ВОПРОС–ОТВЕТ</b>   |                  |        |
| Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2. . . . .  | 1                | 99–104 |
| Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России. . . . .   | 3                | 96–102 |
| Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1. . . . .  | 4                | 76–79  |
| Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2. . . . .  | 5                | 83–86  |

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

**1.** Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу [info@fire-smi.ru](mailto: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](http://www.fire-smi.ru).

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

**2.1.** Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

**2.3.** Информация об авторах.

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

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

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

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

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

**2.3.3.** ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

**2.5.** Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

**2.6.** Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

### 2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

**2.8. References** (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа 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](http://www.fire-smi.ru)).

**3.** Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

**4.** В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

**5.** Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!