

2-2023

**FIRE** and EXPLOSION  
SAFETY

**ПОЖАРОВЗРЫВО-**

# БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

**КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
КЛАРКА – РАЙТА  
В ЗАДАЧАХ ТУШЕНИЯ  
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ СИЛАМИ  
АВИАЦИОННОЙ ОХРАНЫ

## 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 Ю.З.**

### 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

**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 24.04.2023.

Выход в свет 28.04.2023.

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,  
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), член 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

XI Международная конференция  
«Полимерные материалы пониженной горючести»  
19–22 сентября 2023 г., г. Волгоград, Россия

5

XI International Conference  
"Polymeric materials of low flammability"  
September 19–22, 2023, Volgograd, Russia

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

## MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

С.В. ПУЗАЧ, О.С. ЛЕБЕДЧЕНКО  
Математическое моделирование натекания водорода  
в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200

9

S.V. PUZACH, O.S. LEBEDCHENKO  
Mathematical modelling of hydrogen leakage in containment  
area of NPP reactor building with VVER-1200

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## ELECTRICAL ENGINEERING

А.И. НЕДОБИТКОВ, Б.М. АБДЕЕВ  
Оценка несущей способности контактного  
соединения полюсного вывода свинцовой  
аккумуляторной батареи

18

A.I. NEDOBITKOV, B.M. ABDEEV  
Assessment of bearing capacity  
of pole connection of lead-acid storage  
battery terminal

## БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

## SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

Л.Н. ПРЫТКОВ, Н.М. БАРБИН, С.А. ТИТОВ  
Радиационная и пожарная опасность  
натриевого теплоносителя

33

L.N. PRYTKOV, N.M. BARBIN, S.A. TITOV  
Radiation and fire hazard  
of sodium coolant

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

## SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Т.Ю. ЕРЕМИНА, Д.А. МИНАЙЛОВ  
Исследование влияния температурного режима пожара  
на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия,  
предназначенного для огнезащиты стальных конструкций

44

T.Yu. EREMINA, D.A. MINAILOV  
Research of the effect of fire temperature regime  
on the effectiveness of intumescent coating designed  
for fire protection of steel structures

А.В. ПЕХОТИКОВ, Р.А. ИВАЩУК,  
А.В. ГОМОЗОВ, С.А. ЛУЧКИН  
Анализ технических решений по противопожарной защите  
обычных лестничных клеток при реконструкции  
секционных жилых зданий

59

A.V. PEKHOTIKOV, R.A. IVASHCHUK,  
A.V. GOMOZOV, S.A. LUCHKIN  
Analysis of engineering solutions for the fire protection  
of conventional stairwells during the reconstruction  
of residential buildings of sectional type

## СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

## MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

С.А. ЕРМАКОВ, А.А. ДМИТРИЕВ,  
П.Ф. ПОСТАНОГОВА, Д.О. ТОЛСТИКОВ  
Применение метода Кларка – Райта  
в задачах тушения лесных пожаров  
силами авиационной охраны

71

S.A. ERMAKOV, A.A. DMITRIEV,  
P.F. POSTANOGOVA, D.O. TOLSTIKOV  
Application of Clarke and Wright algorithm  
in the tasks of forest fire suppression  
by aviation forest air protections

## ВОПРОС – ОТВЕТ

## QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ  
Современные способы тушения  
литий-ионных аккумуляторов. Часть 2

79

A.S. KHARLAMENKOV  
Modern methods of extinguishing  
lithium-ion accumulators. Part 2

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

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



Оценка контактного соединения свинцовой батареи

Стр. 18



Стр. 44

Исследование температурного режима огнезащитного покрытия



Анализ противопожарной защиты лестничных клеток

Стр. 59



Стр. 71

Задачи тушения лесных пожаров силами авиационной охраны

Стр. 79



Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов

No. 2 VOL. 32  
2023

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



FIRE AND  
SAFETY

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

#### 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 Y.Z.**

#### 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 24.04.2023.  
Date of publication 28.04.2023.  
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)

*Российская академия наук  
Министерство образования и науки Российской Федерации  
Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН  
Волгоградский государственный технический университет  
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России  
Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан  
Научно-исследовательский институт проблем горения Республики Казахстан  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН  
Международная ассоциация специалистов пожарной, промышленной  
и экологической безопасности*



## **XI Международная конференция «ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ»**



**Место проведения конференции:** Волгоградский государственный технический университет,  
Российская Федерация, г. Волгоград,  
проспект имени В.И. Ленина, д. 28

**Дата проведения:** 19–22 сентября 2023 г.

**Официальная страница конференции** — <http://pmpg-2023.vstu.ru>

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

**Председатель:**

Берлин А.А. Научный руководитель ФИЦ химической физики  
им. Н.Н. Семенова РАН, академик РАН

**Сопредседатель:**

Навроцкий А.В. Ректор Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ),  
д.х.н.

**Заместитель  
председателя:**

Сивенков А.Б. Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, Президент МАСПЭБ, д.т.н.

**Члены организационного комитета**

Алдошин С.М. Вице-президент РАН, академик РАН  
Алешков М.В. Заместитель начальника Академии ГПС МЧС России по научной работе, д.т.н.  
Анаников В.П. Заведующий лабораторией металлокомплексных и наноразмерных катализаторов,  
ФГБУН ИОХ им. Н.Д. Зелинского РАН, академик РАН  
Асеева Р.М. Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, д.х.н.  
Аскадский А.А. Заведующий лабораторией полимерных материалов, ИНЭОС РАН, д.х.н.  
Ашуров Н.Р. Заведующий лабораторией НИЦ Химии и физики полимеров при Национальном  
университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека, д.т.н.  
Барботько С.Л. Начальник лаборатории, ФГУП ВИАМ, д.т.н.  
Богданова В.В. Заведующая лабораторией огнетушащих материалов НИИ ФХП Белорусского го-  
сударственного университета, д.х.н.  
Варфоломеев С.Д. Научный руководитель ИБХФ РАН им. Н.М. Эмануэля РАН, член-корр. РАН  
Гаращенко А.Н. Ведущий научный сотрудник, АО «ЦНИИСМ», д.т.н.  
Зыбина О.А. Заместитель начальника Санкт-Петербургского  
Государственного университета ГПС МЧС России, д.т.н.  
Кадыкова Ю.А. Профессор каф. ЭЛЭТ, СГТУ им. Гагарина Ю.А., д.т.н.  
Каблов В.Ф. Профессор каф. ВТПЭ, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, д.т.н.  
Константинова Н.И. Главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России, д.т.н.  
Коробейничев О.П. Главный научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, ИХКГ  
им. В.В. Воеводского СО РАН, д.ф.-м.н.  
Корольченко Д.А. Заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, НИУ МГСУ, д.т.н.  
Ломоносов И.В. И.о. директора ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
член-корр. РАН  
Любавин Н.С. Начальник Главного управления МЧС России по Волгоградской области,  
генерал-майор  
Лысак В.И. Научный руководитель ВолгГТУ, академик РАН  
Мансуров З.А. Генеральный директор Института проблем горения, академик МАН ВШ  
Республики Казахстан, д.х.н.  
Музафаров А.М. НЭОС РАН, академик РАН  
Мухамедгалиев Б.А. Профессор каф. строительных материалов и химии, Ташкентский архитектурно-  
строительный институт, д.х.н.  
Негматов С.С. Научный руководитель ГУП «Фан ва тараккиёт» Ташкентского государствен-  
ного технического университета им. И. Каримова, академик Академии наук  
Республики Узбекистан  
Новаков И.А. Президент ВолгГТУ, академик РАН  
Озерин А.Н. Научный руководитель ФГБУН ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН, член-корр. РАН  
Покровская Е.Н. Профессор каф. КБС, НИУ МГСУ, д.т.н.

Пономаренко С.А.	Директор ФГБУН ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН, член-корр. РАН
Серков Б.Б.	Профессор каф. ПБС, Академия ГПС МЧС России, д.т.н.
Стороженко П.А.	Первый заместитель генерального директора, научный руководитель ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», академик РАН
Трифонов А.А.	Директор ФГБУН ИНЭОС РАН, член-корр. РАН
Шарипханов С.Д.	Начальник Академии гражданской защиты МЧС Республики Казахстан, д.т.н.
Ярославов А.А.	Заведующий кафедрой, МГУ им. М.В. Ломоносова, член-корр. РАН
<b>Ученые секретари:</b>	
Ваниев М.А.	Заведующий кафедрой, ВолгГТУ, д.т.н.
Круглов Е.Ю.	Старший научный сотрудник, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

### Председатель:

Новаков И.А. Президент ВолгГТУ, академик РАН

### Члены программного комитета

Альменбаев М.М.	Начальник факультета, Академия ГЗ МЧС Республики Казахстан, к.т.н.
Анохин Е.А.	Главный научный сотрудник, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.
Гравит М.В.	Доцент ВШПГиДС, Инженерно-строительный институт СПбПУ, к.т.н.
Кейбал Н.А.	Заведующий кафедрой, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, д.т.н.
Кобелев А.А.	Доцент кафедры ПБС, Академия ГПС МЧС России, к.т.н.
Макишев Ж.К.	Начальник кафедры пожарной профилактики, Академия ГЗ МЧС Республики Казахстан, к.т.н.
Рева О.В.	Профессор каф. химической, биологической, радиационной и ядерной защиты, УГЗ МЧС Республики Беларусь, к.х.н.
Сидоренко Н.В.	Доцент каф. ХТПЭ, ВолгГТУ, к.т.н.
Тужиков О.О.	Заведующий кафедрой, ВолгГТУ, д.т.н.
Шишкин Е.В.	Декан химико-технологического факультета ВолгГТУ, д.х.н.

### Технические секретари:

Борисов С.В.	ВолгГТУ, доцент, к.т.н.
Буравов Б.А.	ВолгГТУ, доцент, к.т.н.
Соловьева Ю.В.	ВолгГТУ, ведущий инженер
Федотов И.О.	Академия ГПС МЧС России, адъюнкт

### Основные направления научной конференции:

- Химия и технология функциональных полимеров и материалов на их основе;
- Механизм действия и синтез новых высокоэффективных ингибиторов горения полимеров;
- Разработка новых полимерных материалов и композиций пониженной горючести;
- Термоокислительная деструкция и пиролиз полимеров;
- Теория горения полимерных материалов;
- Экологическая и противопожарная безопасность материалов и конструкций;
- Техника и методы оценки пожарной безопасности полимерных материалов;
- Методы и средства обеспечения требуемой пожарной безопасности строительных конструкций из полимерных материалов;
- Анализ чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

**Программа конференции** включает пленарные, устные и стендовые доклады, а также конкурс на лучшую работу молодых ученых. Планируется проведение круглого стола.

### Ключевые даты

26 декабря 2022 г.	Рассылка первого циркуляра
15 февраля 2023 г.	Начало регистрации участников на сайте ВолгГТУ
1 марта 2023 г.	Рассылка второго циркуляра
1 июня 2023 г.	Окончание регистрации участников
15 июня 2023 г.	Окончание приема материалов докладов
1 июля 2023 г.	Окончание оплаты оргвзноса
19–22 сентября 2023 г.	Работа конференции

### Правила оформления материалов

- Материалы доклада, объем которого должен составлять 2–3 стр., предоставляются по электронным адресам: [pmpg-2023@vstu.ru](mailto:pmpg-2023@vstu.ru); [89268196698@mail.ru](mailto:89268196698@mail.ru);
- Текст должен быть набран в редакторе Word for Windows шрифтом «Times New Roman Cyr» с высотой шрифта 14, межстрочный интервал 1,5;
- Поля страницы: слева и справа — 2,5 см, сверху — 2 см; снизу — 3 см;
- Формулы набираются в MS Equation;
- Рисунки и схемы в тексте должны быть сгруппированы;
- Нумерованные и маркированные списки в тексте не допускаются.

### Порядок печати материалов

Название по центру без переноса полужирным шрифтом строчными буквами, через интервал инициалы и фамилия автора строчными буквами, через интервал полное название организации, далее через интервал текст, в конце которого при необходимости привести список литературы (не более 5 наименований).

За содержание докладов ответственность несут авторы. Программный комитет имеет право отклонить доклад. Все материалы публикуются в авторской редакции.

### Оргвзнос

Очное участие	5000 руб.
Заочное участие	1500 руб.
Студенты и аспиранты	1000 руб.

Проживание участников конференции по предварительной договоренности будет организовано в гостиницах г. Волгограда, а также в санатории-профилактории ВолгГТУ.

**Информация по банковским реквизитам для перечисления оргвзносов (реквизиты ВолгГТУ) размещена на официальной странице конференции <http://pmpg-2023.vstu.ru>.**

### Адрес проведения конференции

Волгоградский государственный технический университет; Российская Федерация, г. Волгоград, проспект имени В.И. Ленина, д. 28.

**Справки по телефонам:** в Волгограде (ВолгГТУ, кафедра ХТПЭ) (8442) 24-80-31  
в Москве: Круглов Евгений Юрьевич +7 (925) 344-19-43  
Федотов Илья Олегович +7 (925) 495-93-78

### Программа конференции

**18 сентября** — заезд участников, размещение участников в гостиницах г. Волгограда.

**19 сентября** — регистрация участников, открытие конференции, пленарное заседание, работа секций, экскурсия по городу-герою Волгограду, товарищеский ужин на теплоходе.

**20 сентября** — работа секций, экскурсия по ВолгГТУ, стендовые секции, круглый стол «Полимерные материалы пониженной горючести. Инновации: проблемы и перспективы».

**21 сентября** — работа секций, подведение итогов конкурса на лучший доклад молодых ученых.

**22 сентября** — подведение итогов, официальное закрытие конференции.

Отъезд участников конференции.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 9–17  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):9-17

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17>

## Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200

Сергей Викторович Пузач ✉, Ольга Сергеевна Лебедченко

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Закономерности образования водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема в начальные моменты времени недостаточно изучены. Поэтому определение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в нижнюю часть подкупольного пространства реакторного здания является актуальным.

**Цели и задачи.** Целью статьи является теоретическое исследование возникновения локальных пожаро- и взрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзоне реакторного здания, для обоснования параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода. Для ее достижения разработана зонная математическая модель расчета концентраций водорода в помещении. Проведены численные эксперименты по определению закономерностей образования водородно-воздушных смесей.

**Теоретические основы.** Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии используется для расчета локальных концентрационных полей водорода. Разработанная зонная модель позволяет определить концентрации водорода в конвективной колонке и в припотолочном слое.

**Результаты и их обсуждение.** Получены характерные поля массовых концентраций водорода в объеме подкупольного пространства. Показано, что на начальной стадии натекания водорода под перекрытием купольного пространства образуется зона припотолочного слоя, что подтверждает обоснованность применения зонной модели. Выполнено сравнение концентраций водорода, полученных по полевой и зонной моделям. Получены распределения массовых концентраций водорода по высоте конвективной колонки при различных числах Рейнольдса в отверстии натекания водорода. Показано, что концентрационные датчики водорода могут диагностировать аварийный режим натекания водорода в подкупольное пространство только в узкой области чисел Рейнольдса  $Re = 900-5000$ . Существует режим натекания ( $Re = 3358$ ), при котором образуется максимальная объемная концентрация водорода в месте расположения концентрационных датчиков при максимальных размерах пожаро- и взрывоопасных зон водородно-воздушной смеси в помещении.

**Выводы.** Используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с водно-водяными реакторами могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2 % об. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

**Ключевые слова:** водородная безопасность; водородно-воздушная смесь; конвективная колонка; зонная математическая модель; трехмерная математическая модель; система контроля и удаления водорода

**Для цитирования:** Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 9–17. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17

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

## Mathematical modelling of hydrogen leakage in containment area of NPP reactor building with VVER-1200

Sergey V. Puzach ✉, Olga S. Lebedchenko

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The patterns of hydrogen-air mixtures formation during the flow of hydrogen into the upper part of a large volume room in the initial moments of time are insufficiently studied. Therefore, the determination of

regularities of formation of local explosive and fire-hazardous hydrogen-air mixtures when hydrogen flows into the lower part of the dome space of the reactor building is important.

**Goals and objectives.** The purpose of the article is a theoretical study of occurrence of local fire and explosive zones of the hydrogen-air mixture generated during hydrogen leakage in the containment area of the reactor building in order to substantiate parameters of concentration sensors of the hydrogen concentration control system. To achieve it, a zone mathematical model of hydrogen concentration calculation in a pressurized room has been developed. Numerical experiments on regularities of hydrogen-air mixtures formation have been carried out.

**Theoretical basis.** The generalized three-dimensional non-stationary differential equation of the laws of conservation of mass, momentum and energy is used to calculate local hydrogen concentration fields. The developed zone model makes it possible to determine hydrogen concentrations in the convective column and in the ceiling layer.

**Results and discussion.** The characteristic fields of hydrogen mass concentrations in the volume of the dome space are obtained. It has been shown that at the initial stage of hydrogen leakage, a zone of the ceiling layer is formed under the ceiling of the dome space, which confirms the validity of the usage of the zone model. The hydrogen concentrations obtained by the field and zone models are compared. The distributions of hydrogen mass concentration along the convective column height at different Reynolds numbers in the hydrogen leakage hole have been obtained. It has been shown that hydrogen concentration sensors can detect a hydrogen leakage mode in the dome space only in a narrow area of Reynolds  $Re = 900-5,000$ . There is a leakage mode ( $Re = 3,358$ ), in which the maximum hydrogen volume concentration is generated at the location of the concentration sensors at the maximum size of the fire and explosive hydrogen-air mixture zones in the room.

**Conclusions.** The hydrogen concentration sensors used in the dome space of the NPP reactor building with water-water reactors may not detect hydrogen at the top point of the dome at a sensitivity threshold of 2 % vol. In this case, in terms of the height of the convective column, hydrogen-air mixtures are formed within the fire and explosive concentration limits.

**Keywords:** hydrogen safety; hydrogen-air mixture; convective column; zone mathematical model; three-dimensional mathematical model; hydrogen control and removal system

**For citation:** Puzach S.V., Lebedchenko O.S. Mathematical modelling of hydrogen leakage in containment area of NPP reactor building with VVER-1200. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):9-17. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17 (rus).

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

## Введение

Водородная безопасность является одним из ключевых элементов обеспечения безопасности на атомных электростанциях (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторными установками (ВВЭР) [1–3].

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критического для безопасности оборудования на АЭС с ВВЭР изложена, например, в работах<sup>1,2,3,4</sup> [4, 5].

При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура реакторной установки вследствие радиолиза, термолиза и других технологических процессов. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности АЭС с ВВЭР является актуальной как для аварийных ситуаций, так и для условий нормальной эксплу-

атации. Места выделения водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР и случаи со взрывом водорода в оборудовании описаны В.М. Берковичем и др.<sup>4</sup> В состоянии «остановка для ремонта» и в переходных режимах выделение газообразного водорода происходит, в том числе, и в полостях оборудования реакторной установки<sup>4</sup>.

В большинстве работ рассматривается только горение и детонация водородно-паровоздушной смеси<sup>5,6</sup> [5–13]. В ИБРАЭ РАН<sup>4</sup> проведены экспериментальные и теоретические исследования физических аспектов процессов горения и детонации, исследования процессов стратификации и горения водородно-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель воды. В результате этих исследований проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса стратификации водородно-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС.

Расчеты в работе<sup>4</sup> выполнены для горения и детонации водорода в гермзоне реакторного здания. В то время как натекание водорода, образовавшегося при радиолизе воды, используемой в технологическом процессе, и возможность образования взрыво-

<sup>1</sup> Мартынов А.В., Рабенков Е.С. Выделение водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-1000. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/>

<sup>2</sup> Рабенков Е.С. Выделение водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-1000. URL: [kms2014/documents/kms2014-010.pdf](https://kms2014/documents/kms2014-010.pdf).

<sup>3</sup> Водородная безопасность АЭС. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики российской академии наук. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/60/>

<sup>4</sup> Беркович В.М., Давыдов Ю.Г., Ефанов А.Д., Лукьянов А.А., Мартынов П.Н. Методы и средства обеспечения водородной безопасности АЭС // Институт «Атомэнергопроект». М. ; Обнинск : ГНЦ ФЭИ. URL: <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report2/misovba0.pdf>

<sup>5</sup> Status report on hydrogen management and related computer codes. NEA/CSNI/R(2014)8 // Nuclear Energy Agency. URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r2014-8.pdf>.

<sup>6</sup> Barilo N. Hydrogen safety panel, safety knowledge tools, and first responder training resources. Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC, May 1, 2019. URL: [cs019\\_barilo\\_2019\\_o.pdf](https://www.oecd-nea.org/csni/csni_r2019_o.pdf)

пожароопасных водородно-воздушных смесей до настоящего времени исследовались только в небольшом количестве работ, например в [14, 15].

На АЭС непрерывный контроль концентрации водорода во время проектных и запроектных аварий в возможных местах его скопления с представлением информации на блочный пульт управления (БПУ) и рабочий пульт управления (РПУ) осуществляет система контроля концентрации водорода, включающая концентрационные датчики водорода с пределом чувствительности 2 % об. Расположение и количество концентрационных датчиков принимается в зависимости от мест наибольшего скопления водорода в случае его натекания в гермзоне.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [6]. Характерное время выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов. Однако динамика натекания в начальные моменты времени процесса недостаточно изучена. Поэтому определение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в нижнюю часть подкупольного пространства реакторного здания является актуальным.

Целью работы является теоретическое исследование возникновения локальных пожаровзрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзоне реакторного здания, для обоснования параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода.

### Теоретические основы

Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии имеет вид [16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho w\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время, с;

$\rho$  — плотность водородно-воздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\Phi$  — зависимая переменная (проекции скорости на координатные оси, массовые концентрации компонентов газовой смеси O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации);

$w$  — скорость водородно-воздушной смеси, м/с;

$\Gamma$  — коэффициент диффузии для  $\Phi$ ;

$S$  — источниковый член.

Начальные условия к уравнению (1) принимаются следующими:

- температуры газовой среды помещения, водорода, ограждающих конструкций помещения и наружного воздуха равны 293 К;
- давления в газовой среде помещения и наружном воздухе на уровне нижней отметки гермзоны равны 10<sup>5</sup> Па;
- массовые концентрации: кислорода —  $X_{O_2} = 0,23$ ; азота —  $X_{N_2} = 0,77$ ; остальных газов — равны нулю.

Граничные условия к уравнению (1) на поверхностях ограждающих конструкций: условие «прилипания» [16] для уравнения неразрывности.

Уравнение (1) решено численно методом контрольных объемов [16] с использованием компьютерной программы<sup>7</sup>.

Распределения концентрации водорода в помещении, полученные с помощью уравнения (1), протестированы в работе [14] на экспериментальных данных [7]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

Из-за больших размеров гермзоны и, соответственно, больших размеров конечно-разностной сетки расчет с использованием полевой модели требует значительных затрат машинного времени (порядка 180 ч).

Поэтому предложена более простая зонная модель, в которой помещение подобно зонной модели для расчета динамики пожара [17] разбивается на 3 зоны: зона конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода, зона припотолочного слоя, содержащая водородно-воздушную смесь, и зона чистого воздуха.

Дифференциальное уравнение для расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещение, имеет вид [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dX_h}{dz} = & \left[ \frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \times \\ & \times \frac{g(d/2 + z \tan \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]} - \\ & - \frac{2 \tan \gamma [(\mu_a - \mu_h)X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \tan \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]} + \\ & + \frac{2 p_0 (d/2 + z \tan \gamma)^3 \tan \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h/X_h]}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d$  — эквивалентный диаметр отверстия, через которое водород поступает в помещение, м;

<sup>7</sup> Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара / Пузач С.В. от 08.12.2006 г.

$X_h$  — средняя по поперечному сечению колонки на высоте  $z$  массовая концентрация водорода;

$z$  — координата вдоль высоты конвективной колонки, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, м;

$B$  — размерный параметр,  $\text{кг}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{кмоль})$ ,  $B = p_0 \mu_h \mu_a / (R_\mu T)$ ;

$\mu_a, \mu_h$  — молекулярные массы воздуха и водорода соответственно,  $\text{кг/кмоль}$ ;

$\rho_a$  — плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$\gamma$  — угол полуоткрытия конвективной колонки, град;

$A$  — размерный параметр,  $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль/с}^2$ ,  $A = G_h^2 / (\pi^2 B)$ ;

$p_0$  — давление воздуха на высоте  $z = 0$ , Па;

$G_h$  — массовый расход водорода, поступающего через отверстие в помещение,  $\text{кг/с}$ ;

$T$  — температура в помещении, К;

$R_\mu$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Распределения концентрации водорода по высоте конвективной колонки, полученные с помощью уравнения (2), протестированы в работе [14] на экспериментальных данных [7]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

Для расчета параметров в зоне припотолочного слоя аналогично зонной модели для расчета динамики пожара решается уравнение закона сохранения массы:

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = G_k, \quad (3)$$

где  $\rho_c$  — средняя плотность водородно-воздушной смеси в припотолочном слое,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V$  — объем зоны припотолочного слоя,  $\text{м}^3$ ;

$G_k$  — расход газовой смеси в поперечном сечении конвективной колонки на высоте нижней границы припотолочного слоя  $z_k$ ,  $\text{кг/с}$ .

Массовый расход  $G$ ,  $\text{кг/с}$ , водородно-воздушной смеси, проходящий через поперечное сечение конвективной колонки на высоте  $z$ , равен:

$$G = G_h + G_a, \quad (4)$$

где  $G_a$  — массовый расход воздуха, подмешивающегося в конвективную колонку до высоты  $z$ ,  $\text{кг/с}$ .

Массовый расход  $G$  можно также представить в виде:

$$G = G_h + X_h, \quad (5)$$

где  $X_h$  находится из уравнения (2).

Объем зоны припотолочного слоя равен:

$$V = \int_{z_k}^H F dz, \quad (6)$$

где  $H$  — высота, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, до максимально высокой точки купола гермзоны, м;

$F$  — переменная площадь поперечного сечения гермзоны,  $\text{м}^2$ .

Интегро-дифференциальное уравнение для определения скорости опускания нижней границы припотолочного слоя после преобразования уравнения (3) с учетом уравнений (2), (5) и (6) имеет вид:

$$\frac{d}{d\tau} \left( \rho \int_{z_k}^H F dz \right) = G_k. \quad (7)$$

Высота нижней границы припотолочного слоя в различные моменты времени определяется из численного решения уравнения (7) методом итераций с помощью разработанной компьютерной программы на языке программирования Fortran.

Компьютерные программы для решения полевой модели (уравнение (1)) и расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки (уравнение (2)) верифицированы в работе [14] на экспериментальных данных [7].

### Исходные данные для проведения численного эксперимента

Модельная задача решена для случая натекания водорода в подкупольное пространство гермзоны реакторного здания АЭС на отметке +26,300 м из-под крышки реактора в соответствии с данными<sup>8</sup>.

Внешний вид подкупольного пространства гермзоны АЭС с ВВЭР и место натекания водорода представлены на рис. 1.

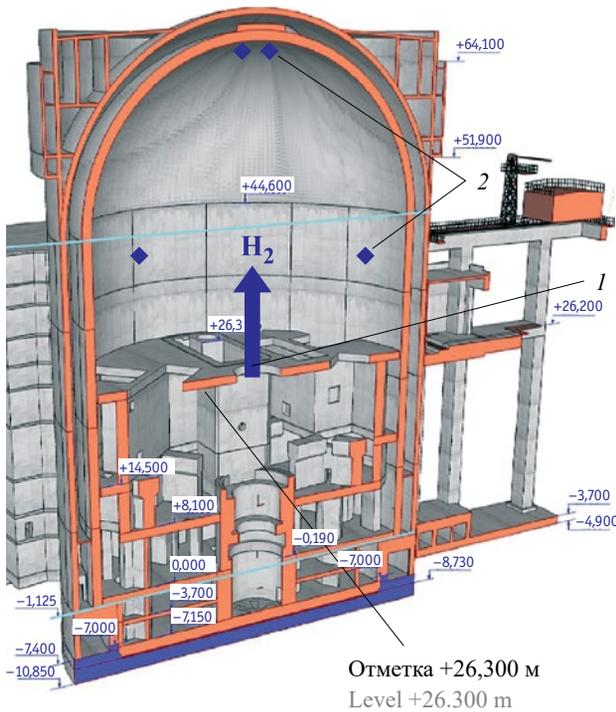
### Результаты численных экспериментов и их анализ

Расчеты по полевой модели и предложенной зонной модели проводились для эквивалентного диаметра отверстия натекания водорода  $d = 1$  м и расхода водорода  $G_h = 0,00116$   $\text{кг/с}^8$ .

На рис. 2 представлены схемы течения и поля массовых концентраций водорода в продольном сечении, проходящем через место истечения водорода в подкупольном пространстве.

Координаты  $x, y, z$  направлены вдоль длины, ширины и высоты подкупольного пространства реакторного здания выше отметки +26,300 м соответственно.

<sup>8</sup> Козлов Д.И., Константинов С.А., Мальцев М.Б., Пересадыко В.Г., Проклов В.Б., Пылёв С.С. Обеспечение локализирующих функций защитной оболочки НВ АЭС-2 (АЭС-2006) при ЗПА с течами из реакторной установки В-392М // ФГУП «Атомэнергопроект». М. : ИПБ ЯЭ РНЦ «Курчатовский Институт». URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/f128.pdf>



**Рис. 1.** Подкупольное пространство гермзоны АЭС с ВВЭР: 1 — место возможного поступления водорода в гермзону; 2 — датчики системы контроля концентрации водорода  
**Fig. 1.** Dome space of the containment area of NPP with VVER: 1 — place of possible hydrogen supply to the containment area; 2 — sensors of hydrogen concentration control system

Из рис. 2 видно, что на начальной стадии натекания водорода под куполом гермзоны образуется припотолочный слой (водородно-воздушная смесь) с достаточно четко выделенной нижней границей. Поэтому предложенное допущение в разработанной зонной модели об образовании зоны припотолочного слоя адекватно физической картине натекания водорода в помещение большого объема. При этом параметры в конвективной колонке практически не меняются по времени процесса.

Расчет распределения объемных концентраций водорода  $X_{ho}$  по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что расчет объемных концентраций водорода с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость при высоте, большей 4 м.

Динамика опускания нижней границы припотолочного слоя над конвективной колонкой, образовавшейся при натекании водорода в подкупольное пространство, показана на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что расчет высоты нижней границы припотолочного слоя с использованием предложенной зонной модели распространения водорода в подкупольном пространстве и полевой модели показал удовлетворительную сходимость. Отличие вышесказанной высоты, рассчитанной по разным моделям,

обусловлено тем, что в зонной модели пренебрегаем работой расширения, совершаемой водородно-воздушной смесью в конвективной колонке.

Численные эксперименты по влиянию числа Рейнольдса в отверстии натекания водорода на распределение концентраций водорода по высоте конвективной колонки проводились с использованием зонной модели для отверстий с диапазоном изменения диаметров  $d = 0,01-1$  м при расходе  $G_h = 0,00116$  кг/с.

Число Рейнольдса определялось как:

$$Re = \frac{\rho_h w d}{\mu}, \quad (8)$$

где  $\rho_h$  — плотность водорода в отверстии истечения водорода, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  — средняя скорость течения в отверстии истечения водорода, м/с;

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости водорода при температуре 293 К и давлении 10<sup>5</sup> Па,  $\mu = 8,8 \cdot 10^{-6}$  кг/(м·с).

Произведение средней скорости на плотность водорода в уравнении (8) находится из величины расхода натекания водорода:

$$G_h = \rho_h w \frac{\pi d^2}{4}. \quad (9)$$

С учетом уравнений (8) и (9) числа Рейнольдса равны:

- при  $d = 1$  м:  $Re = 167,9$  (ламинарный режим течения);
- при  $d = 0,1$  м:  $Re = 1679$  (ламинарный режим течения);
- при  $d = 0,01$  м:  $Re = 16790$  (турбулентный режим течения).

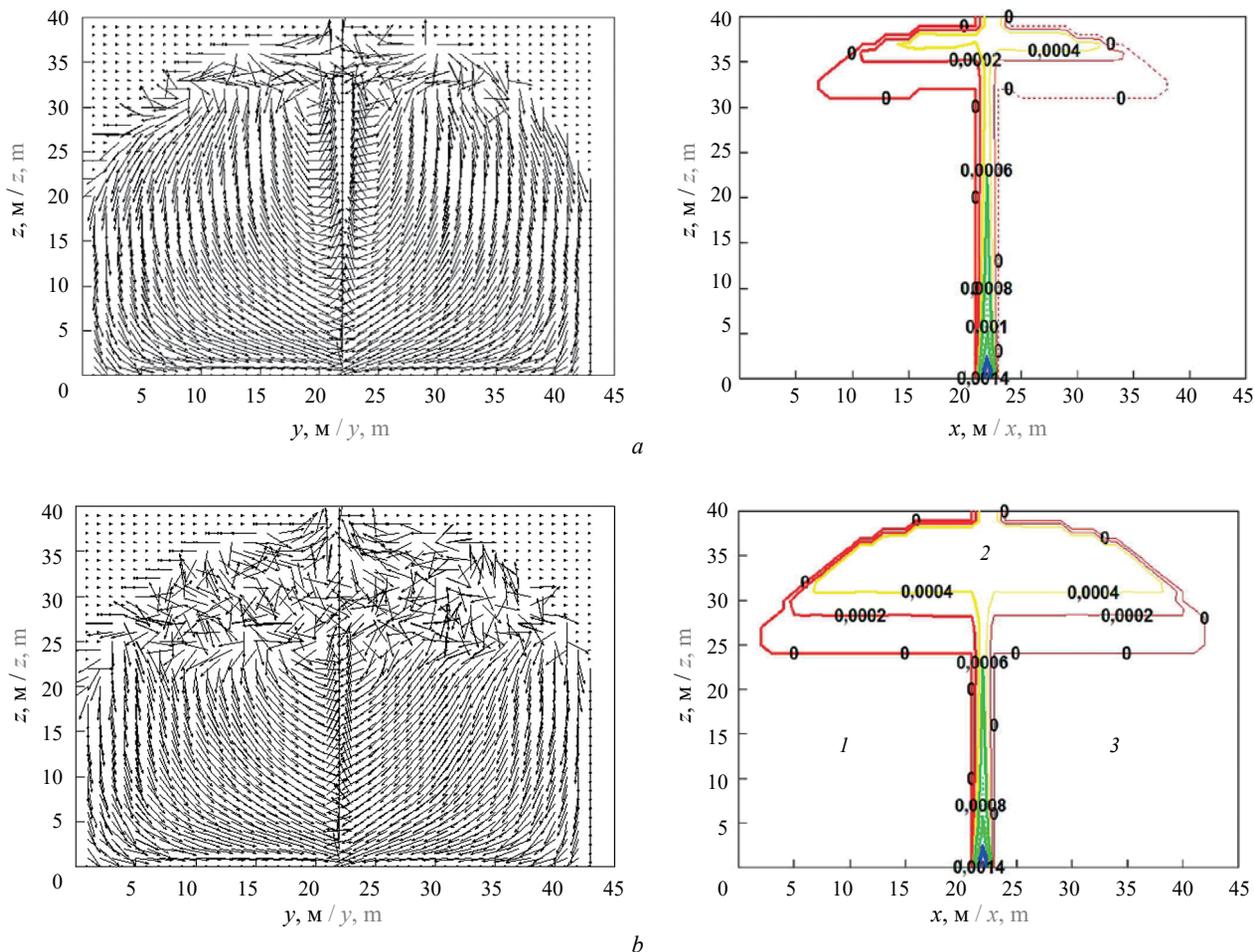
Расчет распределения концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рис. 5.

Обозначения на рис. 5: НКПГ, ВКПГ — нижний и верхний концентрационные пределы горения; НКПВ, ВКПВ — нижний и верхний концентрационные пределы взрыва.

Из рис. 5 видно, что наиболее опасным случаем является натекание водорода через отверстие с  $d = 0,1$  м. В этом случае пожаро- и взрывоопасная водородно-воздушная смесь занимает почти весь объем конвективной колонки.

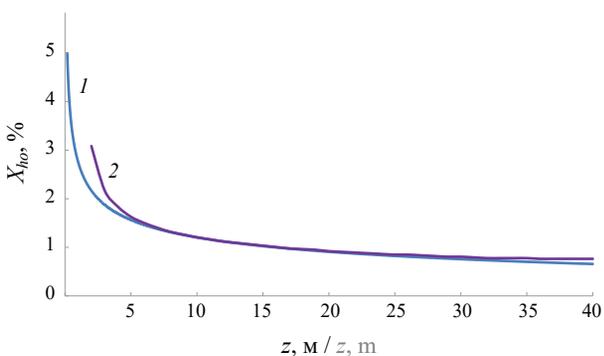
На рис. 6 приведены зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство.

На рис. 7 представлена зависимость объемной концентрации водорода  $X_{hc}$  в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса.

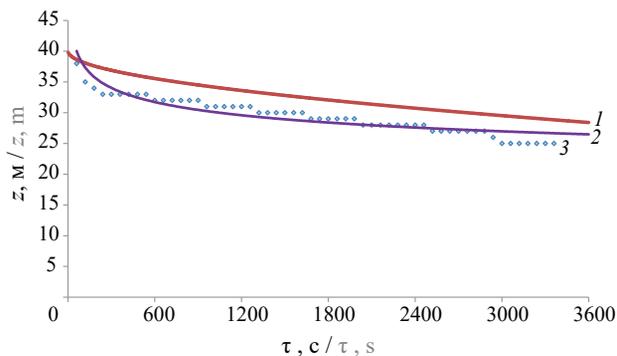


**Рис. 2.** Схемы течения и поля массовой концентрации водорода в вертикальном сечении, проходящем через место натекания водорода: *a* — через 10 мин от начала истечения водорода; *b* — через 1 ч; 1 — зона конвективной колонки; 2 — зона припотолочного слоя; 3 — зона чистого воздуха

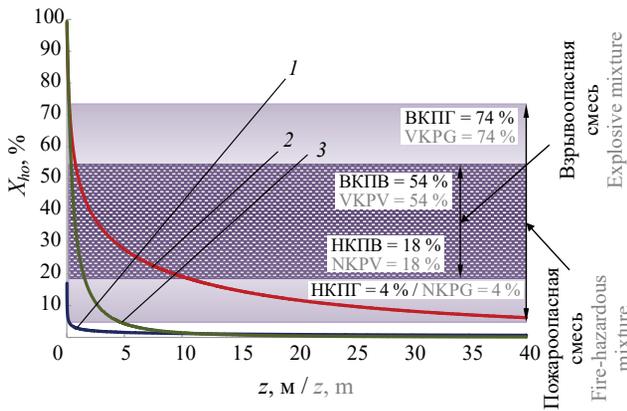
**Fig. 2.** Flow patterns and fields of mass concentration of hydrogen in vertical section passing through the place of hydrogen leakage: *a* — in 10 minutes from the beginning of hydrogen outflow; *b* — in 1 hour; 1 — convective column zone; 2 — the zone of the ceiling layer; 3 — clean air zone



**Рис. 3.** Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки при  $d = 1,0$  м и  $G_h = 0,00116$  кг/с: 1 — зонная модель; 2 — полевая модель  
**Fig. 3.** Distributions of hydrogen volume concentrations by convective column height at  $d = 1.0$  m and  $G_h = 0.00116$  kg/s: 1 — zone model; 2 — field model

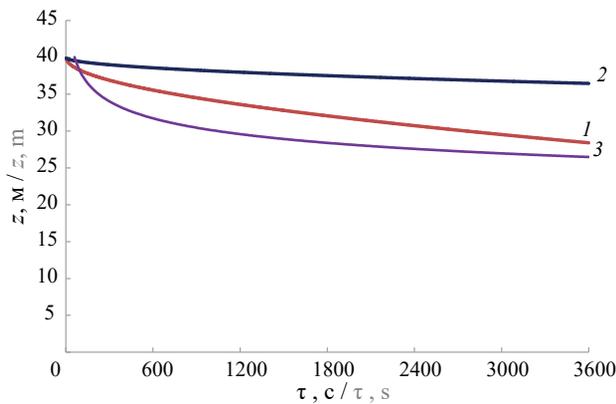


**Рис. 4.** Зависимость высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство при  $d = 1,0$  м и  $G_h = 0,00116$  кг/с: 1 — расчет по зонной модели; 2 — расчет по полевой модели; 3 — линия тренда значений, полученных по полевой модели  
**Fig. 4.** The dependence of the height of the lower boundary of the ceiling layer on the time from the beginning of hydrogen leakage into the dome space at  $d = 1.0$  m and  $G_h = 0.00116$  kg/s: 1 — calculated according to the zone model; 2 — calculation from the field model; 3 — trend line of field model values



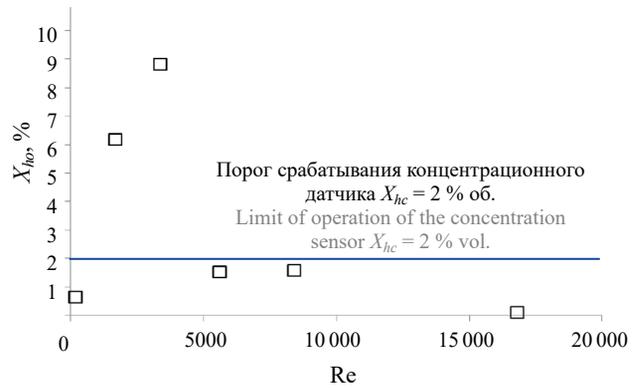
**Рис. 5.** Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия: 1 —  $d = 1$  м; 2 — 0,1 м; 3 — 0,01 м

**Fig. 5.** Distributions of hydrogen volume concentrations by the height of the convective column for the different diameters of the hole: 1 —  $d = 1$  m; 2 — 0.1 m; 3 — 0.01 m



**Рис. 6.** Зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство для различных диаметров отверстия: расчет по зонной модели: 1 —  $d = 1$  м; 2 — 0,1 м; 3 — 0,01 м

**Fig. 6.** Dependence of the height of the lower boundary of the ceiling layer on the time from the beginning of hydrogen leakage into the dome space for different hole diameters: calculation according to the zone model: 1 —  $d = 1$  m; 2 — 0.1 m; 3 — 0.01 m



**Рис. 7.** Зависимость объемной концентрации водорода в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса

**Fig. 7.** Dependence of the volume concentration of hydrogen in the upper point of the dome (location of hydrogen concentration sensors) on the Reynolds number

Из рис. 7 видно, что концентрационные датчики водорода могут диагностировать аварийный режим натекания водорода в подкупольное пространство только в узкой области чисел Рейнольдса  $Re = 900-5000$ .

Кроме того, существует режим натекания ( $Re = 3358$ ), при котором образуется максимальная объемная концентрация водорода в месте расположения концентрационных датчиков при максимальных размерах пожаро- и взрывоопасных зон в водородно-воздушной смеси.

### Выводы

Проведенные численные эксперименты показали, что используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с ВВЭР могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2 % об. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов И.А., Харитонов Н.Л., Шарафутдинов Р.Б., Хренников Н.Н. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (48). С. 1–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29680571>
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors // IAEA-TECDOC-1196. Vienna, 2001.
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident, WAPD-SC-545 // Westinghouse Electric Corp. Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740 // Atomic Energy Commission. 1957.
4. Payot F., Reinecke E., Morfin F., Sabroux J.C., Meynet N., Bentaib A., et al. Understanding of the operation behaviour of Passive Autocatalytic Recombiner(PRA) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accidents // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 248. Pp. 178–196. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.042
5. Shukla V., Ganju S., Varma S., Sengupta S., Maheshwari N.K. Affect of recombiner location on its

- performance in closed containment under dry and steam conditions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 47. Pp. 25957–25973. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.015
6. Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М. Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // *Химическая промышленность*. 1988. № 12. С. 24–27.
  7. Шевяков Г.Г., Савельева Н.И. Распространение и горение струи водорода в открытой атмосфере // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2004. № 1 (9). С. 23–27.
  8. Rubtsov N.M., Seplyarskii B.S. Concentration limits of combustion in rich hydrogen–air mixtures in the presence of inhibitors // *Mendeleev Communications*. 2010. Vol. 20. Issue 5. Pp. 296–298. DOI: 10.1016/j.mencom.2010.09.020
  9. Кириллов И.А., Симоненко В.А., Харитоновна Н.Л. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики // *Российские нанотехнологии*. 2020. Т. 15. № 3. С. 402–414. DOI: 10.1134/S1992722320030061
  10. Пантелеев В.А., Кириллов И.А. Метод описания сценариев каскадных и межсистемных аварий с учетом вероятностных факторов // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2019. № 5. С. 53.
  11. Gharari R., Kazeminejad H., Mataji Kojouri N., Hedayat A. A review on hydrogen generation, explosion and mitigation during severe accidents in light water nuclear reactors // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1939–1965. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.174
  12. Rozen A. Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner // *Nukleonika*. 2018. Vol. 63. Issue 2. Pp. 27–41. DOI: 10.2478/nuka-2018-0004
  13. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. Investigation of a hydrogen mitigation system during large break loss-of-coolant accident for a two-loop pressurized water reactor // *Nuclear Engineering and Technology*. 2016. Vol. 48. Issue 5. Pp. 1174–1183. DOI: 10.1016/j.net.2016.04.002
  14. Пузач С.В., Лебедченко О.С. Расположение взрыво- и пожароопасных участков водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 1. С. 18–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.18-24
  15. Hoyes J.R., Iving M.J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance // *Nuclear Engineering and Design*. 2016. Vol. 310. Pp. 142–153. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.08.036
  16. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
  17. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС, 2005. 336 с.

## REFERENCES

1. Kirillov I.A., Kharitonova N.L., Sharafutdinov R.B., Khrennikov N.N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Nuclear and Radiation Safety*. 2017; 2(48):1-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29680571> (rus.).
2. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors. *IAEA-TECDOC-1196*. Vienna, 2001.
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R. Hydrogen Flammability Data and Application to PWR loss-of-coolant accident, WAPD-SC-545. *Westinghouse Electric Corp*. Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740. *Atomic Energy Commission*. 1957.
4. Payot F., Reinecke E., Morfin F., Sabroux J.C., Meynet N., Bentaib A., et al. Understanding of the operation behaviour of Passive Autocatalytic Recombiner (PRA) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accidents. *Nuclear Engineering and Design*. 2012; 248:178-196. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.042
5. Shukla V., Ganju S., Varma S., Sengupta S., Maheshwari N.K. Affect of Recombiner Location on its Performance in Closed Containment under Dry and Steam Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(47):25957-25973. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.015
6. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume. *Chemical Industry*. 1988; 12:24-27. (rus.).
7. Shevyakov G.G., Savelyeva N.I. Hydrogen jet propagation and burning in ambient air. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya/Alternative Energy and Ecology*. 2004; 1(9):23-27. (rus.).
8. Rubtsov N.M., Seplyarskii B.S. Concentration limits of combustion in rich hydrogen–air mixtures in the presence of inhibitors. *Mendeleev Communications*. 2010; 20(5):296-298. DOI: 10.1016/j.mencom.2010.09.020
9. Kirillov I.A., Simonenko V.A., Kharitonova N.L. Problems of normative, experimental and computation-

- al-theoretical safety of hydrogen energy. *Russian Nanotechnologies*. 2020; 15(3):402-414. DOI: 10.1134/S1992722320030061 (rus.).
10. Panteleev V.A., Kirillov I.A. Method for describing scenarios of cascade and intersystem accidents with taking into account probabilistic factors. *Problems of safety and emergency situations*. 2019; 5:53. (rus.).
  11. Gharari R., Kazeminejad H., Mataji Kojouri N., He-dayat A. A review on hydrogen generation, explosion and mitigation during severe accidents in light water nuclear reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43(4):1939-1965. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.174
  12. Rozen A. Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner. *Nukleonika*. 2018; 63(2):27-41. DOI: 10.2478/nuka-2018-0004
  13. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. Investigation of a hydrogen mitigation system during large break loss-of-coolant accident for a two-loop pressurized water reactor. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016; 48(5):1174-1183. DOI: 10.1016/j.net.2016.04.002
  14. Puzach S.V., Lebedchenko O.S. Location of explosive and fire-hazardous areas of the hydrogen-air mixture along the height of the convective column formed above the source of hydrogen leakage in the room. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(1):18-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.18-24 (rus.).
  15. Hoyes J.R., Ivings M.J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance. *Nuclear Engineering and Design*. 2016; 310:142-153. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.08.036
  16. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat, 1984; 152. (rus.).
  17. Puzach S.V. *Methods of calculating heat and mass transfer in a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of GPS, 2005; 336. (rus.).

Поступила 09.03.2023, после доработки 20.03.2023;

принята к публикации 22.03.2023

Received March 9, 2023; Received in revised form March 20, 2023;

Accepted March 22, 2023

### 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; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 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; РИНЦ ID: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
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; ID RSCI: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Olga S. LEBEDCHENKO**, Cand. Sci. (Legal), Docent, Assistant 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; ID RSCI: 770128, ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

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

## Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи

Александр Игнатьевич Недобитков ✉, Борис Масгутович Абдеев

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Приведенные в статье данные свидетельствуют, что проблема повышения пожарной безопасности при эксплуатации автотранспортных средств очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования контактного соединения полюсного вывода свинцовой стартерной батареи, имеющего признаки большого переходного сопротивления или изменение геометрической формы, для установления причины повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

**Материалы и методы.** Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Объектами исследования являлись полюсные выводы свинцовой батареи европейского типа (EU) и их наконечники. Контактные поверхности наконечников подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

**Теоретические основы (теория и расчеты).** Разработана физико-математическая модель предельной несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи, соответствующая реальной конструкции, и на этой основе сформулирован расчетно-практический алгоритм экспертного анализа ее механико-геометрических характеристик. Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контакта. На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.

**Результаты и обсуждение.** Приведены примеры возгораний автомобилей, возникновение которых обусловлено утратой несущей способности в контакте полюсных выводов аккумуляторной батареи с наконечниками проводов в процессе эксплуатации. Приведены снимки результата большого переходного сопротивления на поверхности контакта и его элементный состав. Экспериментальными данными подтверждено, что перенос материала полюсного вывода на наконечники проводов в виде капель свинца и его наслоений является значимым криминалистическим признаком при установлении причины пожара.

**Выводы.** Предложен метод определения несущей способности контакта полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи с наконечником провода, на основании которого можно сделать вывод о причастности большого переходного сопротивления в контакте к последующему пожару. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании наконечников проводов свинцовых аккумуляторных батарей, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара.

**Ключевые слова:** растровая электронная микроскопия; напряженно-деформированное состояние; пожарно-техническая экспертиза; полюсные выводы; наконечник провода; контактное давление

**Для цитирования:** Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 18–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32

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

## Assessment of bearing capacity of pole connection of lead-acid storage battery terminal

Alexandr I. Nedobitkov ✉, Boris M. Abdeev

East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

### ABSTRACT

**Introduction.** The data given in the article show that the problem of increase of fire safety at operation of vehicles is actual. The main purpose of the article is to develop a scientifically based method of examination of contact connections of pole terminals of starter batteries, which have signs of high transient resistance or change in geometrical shape in order to find out the reason of damage in the course of fire-technical expertise.

**Materials and methods.** The researches were carried out with the use of a scanning-electron microscope JSM-6390LV with an attachment for energy-dispersive microanalysis. The objects of research were pole terminals of a lead-acid storage battery of European type and their tips. Contact surfaces of the tips were analyzed without preliminary sample preparation.

**Theoretical background (theory and calculations).** A physical and mathematical model of ultimate load-bearing capacity of lead battery terminal, which corresponds to real design, has been developed. On this basis, there is formulated a computational and practical algorithm for expert analysis of its mechanical and geometrical characteristics. The solution has been simplified to short calculating formulas, allowing to estimate the contact load-bearing capacity. The applicability of the developed mathematical model to carrying out fire-technical examinations is shown by a concrete example.

**Results and discussion.** Examples are given of car fires, which were caused by loss of load-bearing capacity in the contact of battery terminals with wire-end terminals during in the process of operation. Pictures of the result of high transient resistance on the contact surface and its elemental composition are given. Experimental data confirmed that the transfer of the material of the pole leads to the tips of wires in the form of drops of lead and its layers is a significant forensic feature in determining the cause of the fire.

**Conclusions.** The method of determination of load-bearing capacity of contact of a lead battery pole to the wire end, on the basis of which it is possible to draw a conclusion about participation of great transient resistance in the contact to the subsequent fire, is offered. The data given in the article may be used by specialists during an expert examination of lead battery terminals, seized from places of fires, in order to establish the mechanism of their damage and, finally, the cause of a fire.

**Keywords:** scanning-electron microscopy; stress-strained state; fire-technical expert examination; pole terminals; wire-tip; contact pressure

**For citation:** Nedobitkov A.I., Abdeev B.M. Assessment of bearing capacity of pole connection of lead-acid storage battery terminal. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):18-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32 (rus).

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

## Введение

В работах [1–5] доказательно демонстрируется, что пожары наносят значительный ущерб экономике государства. Статистические сведения, приведенные в работах многих исследователей [4, 6–27], говорят о том, что пожары в автотранспортных средствах по их числу и материальным потерям сегодня постоянно занимают вторую строчку после пожаров, произошедших в жилом секторе. В частности, в работе [20] указывается, что в Российской Федерации пожары, произошедшие на автотранспорте, составляют около 15 % от общего их количества. При этом автором [20] подчеркивается, что в некоторых регионах страны темпы роста числа пожаров на автотранспорте примерно в два раза опережают темпы расширения автомобильного парка, при этом в судебно-экспертных учреждениях ФПС МЧС России сгоревшие автомобили являются одним из основных объектов исследования. Кроме того, для стран Евразийского экономического союза является характерным обстоятельство, что постоянно эксплуатируются автомобили, произведенные 10–30 лет назад. Электропроводка таких автомобилей имеет признаки деградации и часто является причиной пожара. Именно по этой причине И.Д. Чешко в работе [25] ссылается на статистические данные, согласно которым электрические аварийные режимы составляют 30–40 % от общего числа причин пожаров автотранспортных средств.

Актуальность данной работы связана со следующими двумя аспектами. Во-первых, имеет место

весомая доля числа пожаров на автомобильном и промышленном транспорте, связанная со свинцовыми аккумуляторными батареями (АКБ). Например, известен пожар на борту автобуса Nøegh Xiamen в Джексонвилле, штат Флорида, в июне 2020 г., при котором судно и весь его груз были уничтожены с причинением ущерба на сумму 40 млн долларов. Причиной пожара явилась свинцовая аккумуляторная батарея одного из автомобилей, находившегося на борту. Также, по данным NFU Mutual, перегруженные клеммы свинцовых аккумуляторной батареей являются «основным фактором» роста числа возгораний тракторов в Великобритании, при этом страховщик за год выплатил по этой причине почти 19 млн фунтов стерлингов по искам владельцев сельскохозяйственных машин.

Следует напомнить, что в 2021 г. Национальное управление безопасности дорожного движения (NHTSA) начало расследование в отношении 1,9 млн автомобилей Toyota RAV4 2013–2018 гг. выпуска после жалоб на возгорание 12-вольтовой батареи.

Также в 2021 г. Ford отозвал более 30 000 новых пикапов F-150 в Канаде, потому что неправильно прикрепленный зажим аккумуляторной батареи мог привести к остановке двигателя, отказу усилителя тормозов или даже к пожару. Кроме того, отзывная компания затронула 135 000 автомобилей F-150 2019 и 2020 модельных годов в США.

По сообщениям портала «SpeedMe» около 322 тысяч автомобилей моделей Ford Mondeo, Ford S-Max и Ford Galaxy, выпущенные с февраля 2014 г. по февраль 2019 г., будут отозваны из-за утечки

электролита из аккумуляторных батарей, попадание которого на отрицательную клемму вызывает отказ датчика системы контроля АКБ, перегрев батареи и ее возгорание.

Вторым аспектом является мнение авторов [24], которые констатируют, что в настоящее время по-прежнему научное обеспечение исследования пожаров на автотранспортных средствах является недостаточно сформированным и в значительной степени затрудняет работу пожарно-технических экспертов. И это вполне оправданно, поскольку автомобиль является достаточно специфическим объектом как с точки зрения места возникновения пожара, так и источника зажигания, а также особенностей распространения пожара. Именно этим фактором объясняется то обстоятельство, что, несмотря на большое количество проведенных экспериментальных и теоретических работ [6–27], в ряде случаев сложно установить техническую причину пожара автомобиля. Например, в работе [27] приведены криминалистически значимые признаки повреждения латунных наконечников проводов массы автомобиля при большом переходном сопротивлении в контакте, но момент затяжки резьбового соединения не исследовался.

Необходимо уточнить, что в работах [28–30] подробно описано устройство современных свинцовых АКБ и воздействие на них эксплуатационных факторов. В свою очередь, авторами [31–34] предпринята попытка обоснования версии о причастности плохого контакта на полюсном выводе АКБ автомобиля к возникновению пожара. Указанные работы [31–34], а также [25] содержат некоторые криминалистически значимые признаки и условия, но практически не отражают влияние момента затяжки резьбового соединения наконечника полюсного вывода аккумуляторной батареи на возникновение пожароопасного режима.

Автор [5] напомнил, что в 1913 г. Гаррис вывел четыре закона, которым подчиняются электрические контакты. Один из них сформулирован следующим образом: «Сопротивление контактов не зависит от величины их площади, а зависит только от полного давления в контакте» [5]. Кроме того, в работе [35] приведены данные, что с уменьшением усилия сжатия в 2 раза переходное сопротивление контакт-деталей в зависимости от их размеров может увеличиться в 4 и более раз.

Таким образом, основополагающим фактором надежности, и, соответственно, пожарной безопасности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации является обеспечение нормативного контактного давления.

В частности, согласно п. 2.2.3 ГОСТ 10434–82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования» электрическое сопротивление контактных соединений (кроме сварных и паяных), прошедших испытание на соответствие требованиям стандартов и другой технической документации по методике, указанной в ГОСТ 17441, не должно превышать начальное значение более чем в 1,5 раза. Электрическое сопротивление сварных и паяных контактных соединений должно оставаться неизменным. Необходимость обязательного применения моментных индикаторных ключей должна быть указана в стандартах или технических условиях на электротехнические устройства конкретных видов.

В настоящей работе предпринята попытка обосновать математическую модель, применение которой позволит облегчить установление причинной связи между эксплуатационным состоянием контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи и пожаром.

Целью работы является теоретическое обоснование физико-математической модели оценки предельной несущей способности контактного соединения полюсного вывода стартерной свинцовой аккумуляторной батареи.

В статье поставлены следующие задачи:

- разработать уточненную по сравнению с существующей упрощенной методикой расчетную прикладную математическую модель для оценки работоспособности аккумуляторного клеммового соединения, учитывающую физико-механические характеристики материала и равномерно распределенное контактное давление  $q$  между соприкасающимися поверхностями наконечника и полюсного вывода;
- показать, что полученный расчетно-теоретический алгоритм позволяет варьировать, контролировать и обеспечивать требуемый гарантированный натяг  $\delta$  с помощью создания необходимого крутящего момента затяжки  $M_{кл}$  (момента на ключе) в пределах упругости  $\sigma_y$ , то есть без появления недопустимых остаточных (пластических) деформаций, при которых клеммовое соединение полностью выйдет из строя, вследствие чрезмерного ослабления болтового крепления наконечника и нарушения электрического контакта с последующим большим переходным сопротивлением;
- довести решение до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контакта полюсного вывода АКБ и наконечника провода;
- наглядно показать наличие криминалистически значимого признака в виде переноса материала

полюсного вывода на поверхность наконечника провода;

- экспериментально-теоретически показать, что опасно применять латунные и свинцовые (без стальной пружины) наконечники проводов для полюсных выводов стартерной свинцовой аккумуляторной батареи по причине физической нелинейности материала ЛС59-1 при любом моменте на ключе  $M_{кл}$  и малой величины упругой константы  $\sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2$  у свинцово-сурьмянистого сплава  $\text{PbSb}_2$ ;
- проиллюстрировать применимость разработанной математической модели для проведения исследования наконечников полюсных выводов АКБ в рамках пожарно-технической экспертизы.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Объектами исследования являлись полюсные выводы свинцовых аккумуляторных батарей и наконечники их проводов европейского типа (EU). Поверхности разрушения подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

### Теоретические основы

Согласно ГОСТ Р МЭК 60095-2–2010 «Батареи стартерные свинцово-кислотные. Размеры батарей и размеры и маркировка выводов» аккумуляторные батареи могут быть европейского типа (EU), североамериканского типа (AM) и восточно-азиатского типа (AS). В настоящей работе рассматривались только полюсные выводы аккумуляторных батарей европейского типа (EU). В общем случае наконечники полюсных выводов изготавливаются из свинцовистой латуни ЛС59-1, свинцового сплава  $\text{PbSb}_2$  и меди [32]. Согласно технологической документации наконечник (клемма) затягивается на полюсном выводе посредством болтового соединения. Необходимо отметить, что конструктивно свинцовый наконечник должен иметь внутреннюю стальную пружину, но на рынке автомобильных запасных частей встречаются подделки без нее.

Необходимо указать, что известный прикладной метод расчета подобных болтовых соединений [36] является предельно упрощенным, поскольку:

1) при определении соотношения между сосредоточенной нагрузкой  $P$ , сжимающей болтом 2 элементы клеммы 1, и равнодействующей  $Q_r$  распределенного контактного давления  $q$  момент этих сил  $M_c$  относи-

тельно точки  $C$  принимается равным нулю (рис. 1), то есть:

$$M_c = \left( l + \frac{d}{2} \right) - Q_r \cdot \frac{d}{2} = 0, \quad (1)$$

отсюда следует, что:

$$P = Q_r \cdot \frac{d}{2 \left( l + \frac{d}{2} \right)}, \quad (2)$$

где  $l$  — расстояние от оси болта 2 до центра полюсного вывода 4;

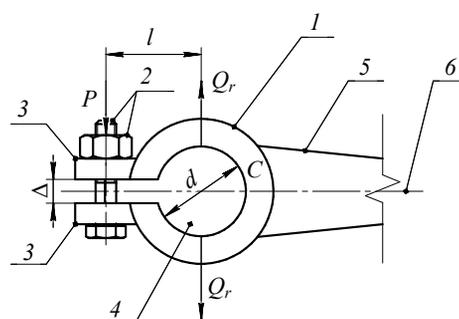
$d$  — внутренний диаметр клеммного наконечника, равный диаметральному размеру элемента 4;

2) в формуле (2) не учитываются физико-механические характеристики материалов, так как силовая система, изображенная на рис. 1, предполагает ее статическую определенность [37, 38], что в принципе не соответствует реальному напряженно-деформированному состоянию клеммного соединения;

3) в той же идеализированной зависимости (2) не предусматривается характер распределения граничного контактного напряжения  $q$ , возникающего между цилиндрическими поверхностями деформируемых тел 1 и 4, а принимается во внимание только его равнодействующая  $Q_r$  без учета упругих свойств конкретных материалов взаимодействующих деталей; однако предпосылку  $M_c = 0$  можно допустить в первом приближении, учитывая конструктивные особенности клеммного крепления, о чем отмечено в [36].

Перечисленные недостатки инженерно-теоретической модели [36] применительно к автомобильной аккумуляторной батарее не обеспечивают:

1) надлежащую математическую модель контроля и регулирования нормативного натяга, то есть



**Рис. 1.** Расчетная схема клеммного соединения, рекомендуемая [36]: 1 — клемма; 2 — болт с гайкой; 3 — консольные части клеммы; 4 — полюсный вывод; 5 — рычаг; 6 — ось симметрии

**Fig. 1.** The calculated diagram of the terminal connection recommended [36]: 1 — terminal; 2 — bolt with a nut; 3 — console parts of the terminal; 4 — pole conclusion; 5 — rod; 6 — axis of symmetry terminal



коэффициент Пуассона:

$$\mu = 0,44; \quad (5)$$

пределы упругости [3, 16]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 0,25 \text{ кг/мм}^2 \\ \tau_y &= \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \approx 0,6\sigma_y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

в границах которых соблюдается закон Гука [37, 40, 42, 43, 45, 48];

- учитывая малую жесткость свинца, по сравнению со сталью [36, 39, 49, 50], у которой среднее значение модуля  $E = 0,18 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$  более чем в 10 раз превышает аналогичную характеристику (4), предусматриваем увеличение начального диаметра  $d$  наконечника после его установки на полюсный вывод, когда появится натяг  $\delta$  [36, 39, 49, 50], а конечный диаметральный размер  $d_k$  станет равным:

$$d_k = d + \delta; \quad (7)$$

- вследствие малой величины щелевого зазора  $\Delta$  между консольными участками соединения (рис. 3, *b*), а именно:

$$\Delta \ll d, \quad (8)$$

считаем реактивное давление  $q$  равномерно распределенным по всей контактной поверхности (рис. 1; 3, *b*):

$$S = \pi \cdot d \cdot H, \quad (9)$$

что позволяет при определении  $\delta$  использовать готовую формулу [38, 39, 49]:

$$\delta = \frac{q}{E} \cdot d \left( 1 + \frac{4R^2 + d^2}{4R^2 - d^2} \right) = \frac{8 \cdot q \cdot d \cdot R^2}{E(4R^2 - d^2)}, \quad (10)$$

как для толстостенной втулки в виде короткого цилиндра, заданной длины  $H$  и толщины  $b$  (моделирующего криволинейные части клеммы), насаженного с требуемым натягом  $\delta$  на сплошной круглый короткий стержень — полюсный вывод (рис. 3, *a, b*).

Согласно тем же литературным источникам [39, 49, 50], при одинаковом материале элементов наконечника радиальное перемещение  $\delta$  не зависит от коэффициента Пуассона  $\mu$  (см. (5)).

Далее, воспользовавшись схемой рис. 3, *b* с полярным углом  $\theta$ , находим равнодействующую [50]:

$$Q_r = H \int_0^{180^\circ} q \cdot \frac{d}{2} \sin\theta \cdot d\theta = H \frac{dq}{2} \cdot (-\cos\theta)|_0^{180^\circ} = Hdq, \quad (11)$$

которую выражаем также через заданный нормативный момент затяжки  $M_{кл}$ :

$$Q_r = \frac{2M_{кл} \left( l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d}, \quad (12)$$

с помощью формул (2), (3).

Приравняв правые части (11), (12), получаем алгебраическое соотношение:

$$H \cdot d \cdot q = \frac{2M_{кл} \left( l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d}, \quad (13)$$

откуда следует очень важная линейная зависимость:

$$q = q(M_{кл}) = \frac{2M_{кл} \left( l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d^2 \cdot H}. \quad (14)$$

Имея функцию  $q(M_{кл})$  и постоянную материала  $\sigma_y$  (см. (6)), можно проконтролировать упругую работу аккумуляторного соединения (рис. 2), опасными местами которого будут (рис. 3, *b*):

- вся внутренняя контактная поверхность криволинейного элемента  $l$  (рис. 2; 3, *b*), где радиальное  $\sigma_r$  и кольцевое  $\sigma_\theta$  главные напряжения достигают экстремальных абсолютных значений [18]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -q \leq 0 \\ \sigma_\theta &= q \frac{4R^2 + d^2}{4R^2 - d^2} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

и на этом основании формулируем первое необходимое граничное неравенство, гарантирующее отсутствие пластических (остаточных) деформаций, в виде рекомендуемой [38, 39, 49] энергетической теории несущей способности (гипотеза Губера – Мизеса – Генки) [37–40, 49]:

$$\sqrt{(\sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_r)} \leq \sigma_y \quad (16)$$

или после подстановки (14), (15):

$$\frac{2M_{кл} \left( l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d^2 \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{8R^2(4R^2 + d^2)}{(4R^2 - d^2)^2} + 1} \leq \sigma_y; \quad (17)$$

- любые поперечные сечения  $l-l$  коротких консолей 3 (рис. 2; 3, *b*) на участке с ненулевой эпюрой  $Q$ , в которых возникают постоянные касательные напряжения (см. также (3) и (6))

$$\tau = \frac{P}{bH} = \frac{M_{кл}}{0,15 \cdot d_\delta \cdot b \cdot H} \leq \tau_y = 0,6\sigma_y \quad (18)$$

чистого сдвига, так как размер  $l_p$  сопоставим с  $b$  и изгиб здесь практически невозможен [37, 40].

Оба условия (17), (18) должны соблюдаться одновременно.

Наряду с проверками (17), (18) необходимо оценить и упругую жесткость на сдвиг консольных участков 3 (рис. 2) по углу  $\gamma$  с целью гарантии невозможности закрытия зазора  $\Delta$  в процессе натяга  $\delta$ . Для осуществления этой процедуры:

- определяем по напряжению  $\tau$  (18) относительную сдвиговую (угловую) малую деформацию в радианах ( $\gamma \ll 1$ ):

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{2(1 + \mu) \cdot M_{\text{кл}}}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H}, \quad (19)$$

где  $G$  — модуль сдвига изотропного материала [37]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (20)$$

- имея  $\gamma$  (19), находим линейную функцию вертикальных перемещений:

$$V = v(x) = \gamma x \quad (21)$$

и ее максимальную величину  $f$  при  $x = 2l_p$ :

$$f = v(2l_p) = \frac{4(1 + \mu) \cdot M_{\text{кл}} \cdot l_p}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H}, \quad (22)$$

- записываем условие деформируемости (рис. 3, b):

$$f = \frac{4(1 + \mu) \cdot M_{\text{кл}} \cdot l_p}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H} \leq 0,5 \Delta, \quad (23)$$

обеспечивающее сохранение щелевого зазора  $\Delta$  в период эксплуатации аккумулятора.

Обобщая представленные выше аналитические зависимости, приводим алгоритм подбора предельно допустимого крутящего момента  $[M_{\text{кл}}]$  упругой затяжки разъемного соединения (рис. 2), схематические модели которого изображены на рис. 3.

1. Определение  $[M_{\text{кл}}]_{\delta}$  и  $[M_{\text{кл}}]_{\tau}$ , руководствуясь (17), (18):

$$[M_{\text{кл}}]_{\delta} = \frac{0,15 \cdot d_{\delta} \cdot d^2 \cdot H \cdot \sigma_y}{2 \left( l + \frac{d}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{8R^2(4R^2 + d^2)}{(4R^2 - d^2)^2} + 1}}; \quad (24)$$

$$[M_{\text{кл}}]_{\tau} = 0,09 d \cdot b \cdot H \cdot \sigma_y. \quad (25)$$

2. Выбор минимального значения из двух  $[M_{\text{кл}}]_{\delta}$  и  $[M_{\text{кл}}]_{\tau}$  в качестве окончательного требуемого момента на ключе  $M_{\text{кл}}$ .

3. Проверка на жесткость консольных элементов 3 клеммового крепления (рис. 2 и 3, b) из условия (23), в котором сделана замена:

$$M_{\text{кл}} = [M_{\text{кл}}]. \quad (26)$$

4. Расчет контактного давления  $q$ , адекватного  $[M_{\text{кл}}]$ , и соответствующего максимально возможного натяга  $\delta$  между контактирующими цилиндрическими поверхностями наконечника 1 и полюсного вывода 2 (рис. 2; 3, b) по формулам (10), (14) с учетом (26).

Завершая теоретический раздел статьи, рассмотрим характерный численный пример, иллюстрирующий возможность практического применения полученных результатов. С этой целью в качестве исходных данных принимаем:

- свинцовый литой наконечник (без стальной пружины) и полюсный вывод (рис. 2; 3, b), имеющие:

$$\left. \begin{aligned} E &= 1800 \text{ кг/мм}^2, \mu = 0,44, \sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2 \\ l &= 21,5 \text{ мм}, d = 17 \text{ мм}, R = 15 \text{ мм} \\ H &= 17 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм}, l_p = 6,5, \Delta = 1 \text{ мм} \end{aligned} \right\}; \quad (27)$$

- натяжной болт М6 с расчетным диаметром:

$$d\delta = 6 \text{ мм}. \quad (28)$$

Выполняя вычисления в порядке позиций 1–4 алгоритма, получаем:

$$1) \left. \begin{aligned} [M_{\text{кл}}]_{\delta} &= \frac{0,15 \cdot 6 \cdot 17^2 \cdot 17 \cdot 0,25}{2 \left( 21,5 + \frac{17}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot 15^2 (4 \cdot 15^2 + 17^2)}{(4 \cdot 15^2 - 17^2)^2} + 1}} = \\ &= 7,1 \text{ кг} \cdot \text{мм} \end{aligned} \right\}; \quad (29)$$

$$2) \left. \begin{aligned} [M_{\text{кл}}]_{\tau} &= 0,09 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 17 \cdot 0,25 = 18,36 \text{ кг} \cdot \text{мм} \\ [M_{\text{кл}}]_{\delta} &= M_{\text{кл}} = 7,1 \text{ кг} \cdot \text{мм} \approx 0,071 \text{ Н} \cdot \text{м}; \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$3) \left. \begin{aligned} f &= \frac{4(1 + 0,44) \cdot 7,1 \cdot 6,5}{0,15 \cdot 18\,006 \cdot 8 \cdot 17} = \\ &= 0,0012 \leq 0,5 \Delta = 0,5 \text{ мм}; \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$4) \left. \begin{aligned} \frac{2 \cdot 7,1 \left( 21,5 + \frac{17}{2} \right)}{0,15 \cdot 6 \cdot 17^2 \cdot 17} &= 0,096 \text{ кг/мм}^2 \\ \delta &= \frac{8 \cdot 0,096 \cdot 17 \cdot 15^2}{1800 (4 \cdot 15^2 - 17^2)} = 0,00267 \text{ мм} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Таким образом, в данном конкретном примере обеспечить упругую работу клеммового соединения возможно только при соблюдении условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{кл}} &\leq [M_{\text{кл}}]. \\ [M_{\text{кл}}] &= 0,071 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

С другой стороны, найденное значение в десятки раз меньше нормативного усилия  $M_{\text{кл}}^{(H)}$ , приведенного в инструкции к транспортному средству (то есть электрический контакт ненадежен, так как не выполняется теорема). Например, момент затяжки  $M_{\text{кл}}^{(H)}$ ,

для легкового автомобиля LADA Vesta должен быть в пределах 4–6 Н·м. Если наконечник полюсного вывода будет выполнен из свинца, то это приведет к утрате упругости в контакте, отсутствию контактного давления и автоматическому появлению большого переходного сопротивления.

Поэтому, чтобы удовлетворить всем необходимым эксплуатационно-технологическим требованиям, следует использовать для клеммового наконечника сплав, обладающий высоким пределом упругости  $\sigma_y$  и малым электрическим сопротивлением. В частности, для получения  $[M_{кл}]$  в диапазоне 2–3 Н·м физико-механическая константа  $\sigma_y$  должна быть не менее 7,04–10,56 кг/мм<sup>2</sup> по граничному условию упругости (17) со знаком равенства. И в соответствии с (14) предельное расчетное значение реактивного давления  $q$  станет при этом равным  $q = 2,71–4,07$  кг/мм<sup>2</sup>. Такой уровень  $q$ , по сравнению с (32), где  $q = 0,096$  кг/мм<sup>2</sup>, будет уже вполне достаточным для создания качественного электрического контакта в соединении наконечника с полюсным выводом.

Оптимальным конструктивным решением данной проблемы является применение сплавов, обладающих упругостью и электропроводностью, например, бериллиевая бронза БрБ2 (ГОСТ 18175–78), у которой  $\sigma_y = 960$  МПа ( $\approx 96$  кг/мм<sup>2</sup>), что больше  $\sigma_y = 0,25$  кг/мм<sup>2</sup> у свинцово-сурьмянистого сплава PbSb<sub>2</sub> в 384 раза. Несомненно, стоимость бериллиевой бронзы выше, чем свинцово-сурьмянистого сплава, но ее применение обеспечивает высокое качество электрического контакта и, соответственно, пожарную безопасность соединения наконечника с полюсным выводом.

## Результаты и их обсуждение

Согласно ГОСТ 25866–83 «Эксплуатация техники. Термины и определения», условия эксплуатации — это совокупность факторов, действующих на изделие при его эксплуатации, при этом к внешним факторам, действующим на изделие в процессе эксплуатации, относятся природные условия, тепло-

вые, химические и механические воздействия, запыленность, влажность и т.д. [5].

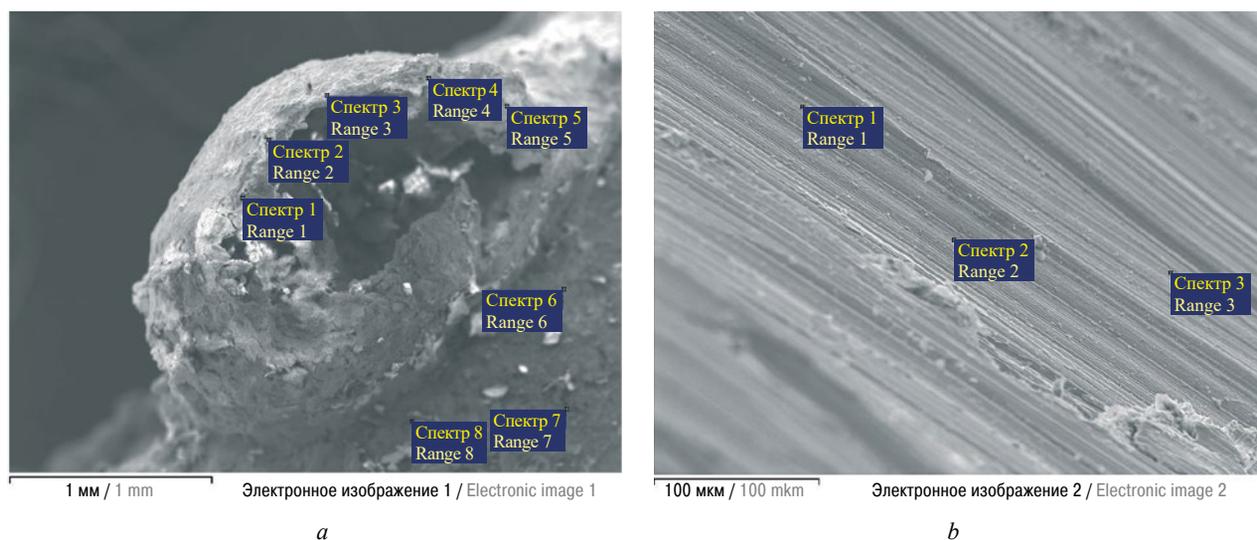
В работе [32] приведен пример повреждения контактной поверхности клеммы АКБ и на основе световой микроскопии установлено, что имеют место оплавления, вздутия, каверны, характерные для электрической дуги при электроэрозии. Следует отметить, что согласно ГОСТ 27674–88 «Трение, изнашивание и смазка», электроэрозионное изнашивание — эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. В свою очередь, автор [51] указывает, что разрушение контактов при электроэрозии имеет три механизма. Это испарение, разбрызгивание расплавленного металла и химические процессы, связанные с взаимодействием материала контактов с элементами окружающей среды, и разрушение образовавшихся пленок при термическом воздействии. Вполне очевидно, что методами оптической микроскопии выявить все многообразие признаков электроэрозии не представляется возможным. Например, капля свинца полюсного вывода АКБ при разбрызгивании будет выглядеть так же, как и капля этого металла, образовавшаяся при высокотемпературном воздействии в процессе пожара. Растровая микроскопия в данном случае более информативна, поскольку позволяет провести микроанализ и тем самым определить химический состав как капли металла, так и пленки. Более того, в работе [52] приведен ряд типичных экспертных ошибок при использовании такого метода, как оптическая микроскопия.

Также авторы [32], анализируя состояние клеммы АКБ, приходят к выводу, что она была не затянута с нормативной затяжкой, либо не была одета до конца на выводной бурт. На рис. 4 показаны наконечники полюсных выводов АКБ, при этом все они затянуты до состояния, при котором их внутренний диаметр равен значению, приведенному в ГОСТ Р МЭК 60095-2–2010 «Батареи стартерные свинцово-кислотные. Размеры батарей и размеры



**Рис. 4.** Повреждения наконечников полюсных выводов аккумуляторных батарей: *a* — капли металла на внутренней поверхности; *b* — перенос материала на внутренней поверхности; *c* — изменение конструкции резьбового соединения; *d* — оплавление полюсного вывода при полностью затянутом резьбовом соединении

**Fig. 4.** Damage to battery pole terminals: *a* — metal droplets on the inner surface; *b* — material transfer on the inner surface; *c* — change in the design of the threaded connection; *d* — melting of the pole lead when the threaded connection is fully tightened



**Рис. 5.** Точки микроанализа: *a* — на внутренней поверхности наконечника полюсного вывода аккумуляторной батареи; *b* — на зачищенной от сажи и окислов поверхности

**Fig. 5.** Microanalysis points: *a* — on the inner surface of the tip of the pole terminal of the battery; *b* — on a surface cleaned from soot and oxides

и маркировка выводов». На рис. 4, *b* видна маркировочная отметка краской синего цвета, на рис. 4, *c* показан пример изменения конструкции путем установки более длинного болта и дополнительной гайки с целью увеличения контактного давления.

На рис. 4, *d* приведен пример, когда консольные части клеммы АКБ фактически прижаты друг к другу, но тем не менее большое переходное сопротивление в контакте привело к оплавлению полюсного ввода. Таким образом, фактические данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют об утрате упругости в контакте, отсутствии контактного давления и автоматическом появлении большого переходного сопротивления, даже при регламентированной затяжке резьбового соединения. Как показывают вышеприведенные расчеты, это возможно лишь при одном условии — конструктивно

ненадежном электрическом контакте, при котором не выполняется соотношение (33).

На рис. 5 показаны точки микроанализа на внутренней поверхности наконечника полюсного вывода АКБ, имеющего оплавление.

Из табл. 1 следует, что оплавление в виде капли металла согласно точкам измерения 1–5 содержит от 47,32 до 91,60 % свинца со следами меди и сурьмы. Температура плавления свинца составляет 327,5 °С, а температура кипения — 1751 °С. Необходимо отметить, что токоотводы электродов стартерных аккумуляторов и полюсные выводы отливают из свинцово-сурьмянистого сплава. В то же время в точках 6–8, удаленных от капли металла, содержание меди составляет от 6,46 до 23,69 % и появляются следы железа.

В табл. 2 приведены данные по участку, очищенному от продуктов пожара. Согласно табл. 2, нако-

**Таблица 1.** Результаты микроанализа участка на рис. 5, *a*

**Table 1.** The results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5, *a*

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass											
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Sn	Sb	Pb
Спектр 1 / Range 1	3,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	4,08	0,00	0,00	91,60
Спектр 2 / Range 2	15,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	12,17	69,62
Спектр 3 / Range 3	29,51	0,33	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,66	13,81	47,32
Спектр 4 / Range 4	23,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	75,94
Спектр 5 / Range 5	22,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,29	0,00	0,00	69,83
Спектр 6 / Range 6	29,17	0,00	0,00	0,92	1,12	3,53	0,75	1,83	6,46	0,00	0,00	56,22
Спектр 7 / Range 7	26,67	9,64	0,00	0,00	0,00	3,91	0,93	1,07	23,69	0,00	0,00	34,10
Спектр 8 / Range 8	24,25	0,00	1,50	0,63	2,01	1,86	0,00	0,75	17,56	4,46	0,00	46,97

**Таблица 2.** Результаты микроанализа участка на рис. 5, *b*  
**Table 2.** The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 5, *b*

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass						
	O	Al	Sn	Fe	Cu	Pb	Zn
Спектр 1 / Range 1	6,79	0,00	0,00	1,08	83,98	8,14	0,00
Спектр 2 / Range 2	0,00	0,89	0,00	0,00	99,11	0,00	0,00
Спектр 3 / Range 3	0,00	0,74	0,00	0,00	99,26	0,00	0,00

нечник полюсного вывода выполнен из меди, температура плавления которой составляет 1083 °С. При сопоставлении данных табл. 1 и табл. 2 следует вывод, что в контакте полюсный вывод–наконечник имеет место испарение и разбрызгивание расплавленного металла (Cu, Pb, Sb), что является характерным признаком электроэрозии [50]. Следы железа могут быть объяснены электродуговым процессом на поверхности резьбового соединения болт–гайка наконечника полюсного вывода.

В работе [32] приведен алгоритм отработки версии о причастности «плохого» контакта на клемме аккумулятора батареи автомобиля к возникновению пожара. Предлагается дополнить его проверкой условия (33) о возможности упругой работы клеммового соединения. Если условие не выполняется, то причина пожара может быть связана с конструктивным недостатком, если выполняется, то необходимо совместно с экспертом-автотехником рассмотреть эксплуатационные причины утраты несущей способности клеммового соединения.

Также необходимо отметить, что у современных автомобилей утрата несущей способности клеммового соединения аккумуляторной батареи зачастую не приводит к пожару. На рис. 4, *b* показан наконечник полюсного вывода автомобиля Toyota Land Cruiser 150/GRJ150. У данного автомобиля при движении вследствие разрядов при прохождении электрического тока в клеммовом соединении АКБ и импульса тока произошел одновременный отказ блока распределения питания, блока мультиплекс, блока кондиционера, блока управления двигателем, блока управления фарой, комбинации приборов, генератора, блока иммобилайзера, блока АБС, блока управления подвеской. В подобном случае именно растровая микроскопия может зафиксировать микропризнаки электроэрозии в наконечнике полюсного вывода.

Таким образом, в результате применения расчетного метода и растровой микроскопии при исследовании клеммового соединения АКБ можно установить криминалистически значимые признаки, позволяющие установить причинную связь между утратой контактом несущей способности и пожаром.

## Выводы

Примерами из практики наглядно проиллюстрировано, что в соединении полюсный вывод АКБ — наконечник провода может иметь место утрата несущей способности контакта, обусловленная как эксплуатационными, так и конструктивными факторами, что ведет к его нагреву и в конечном счете к возгоранию автотранспортного средства, дорожной, сельскохозяйственной или горнодобывающей машины.

Разработана уточненная по сравнению с существующей упрощенной методикой расчета прикладная математическая модель для оценки работоспособности аккумуляторного клеммового соединения, учитывающая физико-механические характеристики материала и равномерно распределенное контактное давление  $q$  между соприкасающимися поверхностями наконечника и полюсного вывода.

Показано, что полученный расчетно-теоретический алгоритм позволяет варьировать, контролировать и обеспечивать требуемый гарантированный натяг  $\delta$  с помощью создания необходимого крутящего момента затяжки  $M_{кл}$  (момента на ключе) в пределах упругости  $\sigma_y$ , то есть без появления недопустимых остаточных (пластических) деформаций, при которых клеммовое соединение полностью выйдет из строя, вследствие чрезмерного ослабления болтового крепления наконечника и нарушения электрического контакта с последующим большим переходным сопротивлением.

Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контакта полюсного вывода АКБ и наконечника провода.

Наглядно показано наличие криминалистически значимого признака в виде переноса материала полюсного вывода на поверхность наконечника провода при большом переходном сопротивлении.

Экспериментально-теоретически показано, что опасно применять латунные и свинцовые (без стальной пружины) наконечники проводов для полюсных выводов стартерной свинцовой аккумуляторной батареи по причине физической нелинейности материала ЛС59-1 при любом моменте на ключе  $M_{кл}$

и малой величины упругой константы  $\sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2$  у свинцово-сурьмянистого сплава  $\text{PbSb}_2$ .

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании наконечников проводов полюсных выводов свинцовых стартерных батарей, изымаемых с мест пожаров, установ-

лении механизма их повреждения и в конечном счете причины пожара. В свою очередь, знание технической причины пожара даст возможность разработать профилактические мероприятия и конструктивные решения, направленные на ее устранение.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В.* Какова «стойкость» пожаров в современном мире? // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88
2. *Quintiere J.G.* Fundamentals of fire phenomena. Chichester : John Wiley and Sons Ltd., 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. *Babrauskas V.* Arc mapping: a critical review // *Fire Technology*. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. *Недобитков А.И., Абдеев Б.М.* О физической основе локальной токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 6. С. 18–28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.18-28
5. *Недобитков А.И., Абдеев Б.М.* Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 1. С. 65–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76
6. *Dorsz A, Lewandowski M.* Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 1. P. 11. DOI: 10.3390/en15010011
7. *Gudym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., Gavryliuk A.* The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 136. P. 106198. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106198
8. *Brzezinska D., Ollesz R., Bryant P.* Design car fire size based on fire statistics and experimental data // *Fire and Materials*. 2020. Vol. 44. Issue 8. Pp. 1099–1107. DOI: 10.1002/fam.2913
9. *Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo.* Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 22. P. 100795. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100795
10. *Park Y., Ryu J., Ryu H.S.* Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter // *Energies*. 2019. Vol. 12. Issue 8. P. 1465. DOI: 10.3390/en12081465
11. *Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong.* Analysis of a fire in a parked camping car // *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 217–223. DOI: 10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217
12. *Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao, Xiaohui Jiang.* Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2017. Vol. 10. Pp. 315–324. DOI: 10.1016/j.csite.2017.08.001
13. *Xiao-hui Jiang, Guo-qing Zhu, Hui Zhu, Da-yan Li.* Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. Pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
14. *Lee Eui-Pyeong.* Analysis of a car fire caused by a fuel leakage from the common rail // *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2018. Vol. 18. Issue 4. Pp. 225–231. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225
15. *Kruger S., Hofmann A., Berger A., Gude N.* Investigation of smoke gases and temperatures during car fire — large-scale and small-scale tests and numerical investigations // *Fire and Materials*. 2016. Vol. 40. Issue 6. Pp. 785–799. DOI: 10.1002/fam.2342
16. *Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., Watanabe N.* Burning behavior of minivan passenger cars // *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.09.010
17. *Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., et al.* Burning behavior of sedan passenger cars // *Fire Safety Journal*. 2008. Vol. 44. Issue 3. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
18. *Xiao-hui J., Guo-qing Z., Hui Z., Dayan L.* Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. Pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
19. *Ferrone C.W.* Commercial vehicle fire, cause and origin analysis // *Mechanical, electrical and forensic methods : 2nd int. conf., Fires in Vehicles*. Chicago, USA, 2012. Pp. 83–93.
20. *Скодтаев С.В.* Механизм и морфологические признаки аварийных пожароопасных процессов в электросетях автомобилей : дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. 140 с.
21. *Johnsson E.L., Yang J.C.* Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration // *Fire and Materials*. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 416–426. DOI: 10.1002/fam.2295
22. *Харламенков А.С.* Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1120/0>

23. Ложкин В.Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74
24. Ворошилов Р.Ф., Мурашкевич Е.А. Исследование поврежденного огнем легкового автомобиля после воздействия тепла пожара при разгерметизации топливной системы // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. Т. 18. № 3. С. 38–41. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006
25. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. Кн. 1. СПб: Типография «Береста», 2010. 708 с.
26. Сметков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: ООО «Кабель», 2009. 328 с.
27. Недобитков А.И. Экспертное исследование автомобильных латунных кабельных наконечников провода массы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 6. С. 29–35. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/431>
28. Prengaman R.D. The metallurgy and performance of cast and rolled lead alloys for battery grids // The Battery Man. 1997. Pp. 16–36.
29. Rand D.A.J., Boden D.P., Lakshmi C.S., Nelson R.R., Prengaman R.D. Manufacturing and operational issues with lead-acid batteries // Journal of Power Sources. 2002. Vol. 107. Issue 2. Pp. 280–300. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01083-7
30. Русин А., Найденов В., Кудрявцев А. Современные свинцовые аккумуляторы / под ред. проф. А.И. Русина. СПб.: Петрополис, 2017. 148 с.
31. Barnett G.J. Vehicle battery fires: why they happen and how they happen. Warrendale, Pennsylvania: SAE International Ltd., 2017. DOI: 10.4271/R-443
32. Горбунов А.С., Васильев А.В., Беляк А.Л., Могильникова А.В. Порядок отработки версии о причастности плохого контакта на клемме аккумуляторной батареи автомобиля к возникновению пожара // Образование и право. 2021. № 10. С. 450–456. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poryadok-otrabotki-versii-o-prichastnosti-plohogo-kontakta-na-klemme-akkumulyatornoy-batarei-avtomobilya-k-vozniknoveniyu-pozhara>
33. Zhenyu Li, Zhongjie Wang, Liang Wang. Discussion of the relationship between failure and fire of valve regulated lead acid battery // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 185. P. 01058. DOI: 10.1051/e3s-conf/202018501058
34. Карасев Е.В., Таратанов Н.А., Чурбанов Н.Б. Исследование процесса возникновения и развития пожара на объекте строительной техники // Пожарная и аварийная безопасность. 2021. № 2 (21). С. 26–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46249438>
35. Волкова О.Г., Жорняк Л.Б. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильноточных разрывных контактов // Электротехника и электромеханика. 2016. № 1. С. 12–16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-mehanicheskogo-vzaimodeystviya-rabochih-poverlhnostey-silnotochnyh-razryvnyh-kontaktov>
36. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
37. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учеб. пос. М.: Наука, 1986. 560 с.
38. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.
39. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
40. Филлин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. М.: Наука, 1975. 832 с.
41. Жидков А.В., Любимов А.К. Плоские задачи теории упругости: учеб.-мет. пос. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2019. 38 с.
42. Стружанов В.В., Бурмашева Н.В. Теория упругости: основные положения: учеб. пос. / В.В. Стружанов, Н.В. Бурмашева. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 204 с.
43. Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения / пер. с нем. М.: Мир, 1988. 344 с.
44. Кац А.М. Теория упругости. СПб.: Изд-во Лань, 2002. 208 с.
45. Скрипняк Е.Г., Жукова Т.В., Скрипняк В.А. Математическая постановка задач линейной теории упругости: учеб. пос. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 26 с.
46. Киселев В.А. Плоская задача теории упругости: учеб. пос. для вузов. М.: Высшая школа, 1976. 151 с.
47. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М.И. Рейтмана, под ред. Г.С. Шапиро. М.: Наука, 1975. 576 с.
48. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости: монография. М.: Физматлит, 2004. 299 с.
49. Бояришинов С.В. Основы строительной механики машин: учеб. пос. М.: Машиностроение, 1973. 456 с.
50. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. 13-е изд. испр. М.: Наука, 1986. 544 с.
51. Берент В.Я. Электроэрозия электрических контактов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 2. С. 88–96.
52. Лютов В.П., Шлыков Д.А. Оптическая микроскопия как источник экспертных ошибок // Энциклопедия судебной экспертизы: научно-практический журнал. 2016. Вып. 4 (11). URL: [http://proexpertizu.ru/theory\\_and\\_practice/led/703/](http://proexpertizu.ru/theory_and_practice/led/703/)

## REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire "cost" in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1): 79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).
2. Quintiere J.G. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. Nedobitkov A.I., Abdeev B.M. On physical basis of local current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):18-28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.18-28 (rus).
5. Nedobitkov A.I., Abdeyev B.M. Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within the framework of a fire investigation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):65-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76 (rus).
6. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures. *Energies*. 2022; 15(1):11. DOI: 10.3390/en15010011
7. Gudym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., Gavryliuk A. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 136:106198. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106198
8. Brzezinska D., Ollesz R., Bryant P. Design car fire size based on fire statistics and experimental data. *Fire and Materials*. 2020; 44(8):1099-1107. DOI: 10.1002/fam.2913
9. Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 22:100795. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100795
10. Park Y., Ryu J., Ryou H.S. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter. *Energies*. 2019; 12(8):1465. DOI: 10.3390/en12081465
11. Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong. Analysis of a fire in a parked camping car. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2019; 19(1):217-223. DOI: 10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217
12. Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao, Xiaohui Jiang. Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2017; 10:315-324. DOI: 10.1016/j.csite.2017.08.001
13. Xiao-hui Jiang, Guo-qing Zhu, Hui Zhu, Da-yan Li. Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211:297-305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
14. Lee Eui-Pyeong. Analysis of a car fire caused by a fuel leakage from the common rail. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2018; 18(4):225-231. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225
15. Kruger S., Hofmann A., Berger A., Gude N. Investigation of smoke gases and temperatures during car fire-large-scale and small-scale tests and numerical investigations. *Fire and Materials*. 2016; 40(6): 785-799. DOI: 10.1002/fam.2342
16. Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., Watanabe N. Burning behavior of minivan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2013; 62:272-280. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.09.010
17. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., et al. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(3): 301-310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
18. Xioa-hui J., Guo-qing Z., Hui Z., Dayan L. Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211:297-305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
19. Ferrone C.W. Commercial vehicle fire, cause and origin analysis. *Mechanical, electrical and forensic methods : 2nd int. conf., Fires in Vehicles, Chicago, USA, 2012*; 83-93.
20. Skodtaev S.V. *Mechanism and morphological features of emergency fire-dangerous processes in electric networks of cars : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2019; 144. (rus).
21. Johnsson E.L., Yang J.C. Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration. *Fire and Materials*. 2016; 40(3):416-426. DOI: 10.1002/fam.2295
22. Kharlamenkov A.S. The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3): 96-102. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1120/0> (rus).
23. Lozhkin V.N. Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):65-74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74 (rus).
24. Voroshilov R.F., Murashkevich E.A. Investigation of a car damaged by fire after exposure to the heat of a fire during depressurization of the fuel system. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2020; 18(3):38-41. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006 (rus).
25. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. *Analysis of expert versions of fire occurrence. Book 1*. St. Petersburg, Beresta Publ., 2010; 708. (rus).
26. Smelkov G.I. *Fire safety of wirings*. Moscow, LLC "Kabel" Publ., 2009; 328. (rus).
27. Nedobitkov A.I. Expert research of automobile brass cable lug wire weight. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire*

- and *Explosion Safety*. 2015; 24(6):29-35. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/431> (rus).
28. Prengaman R.D. The metallurgy and performance of cast and rolled lead alloys for battery grids. *The Battery Man*. 1997; 16-36.
  29. Rand D.A.J., Boden D.P., Lakshmi C.S., Nelson R.R., Prengaman R.D. Manufacturing and operational issues with lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*. 2002; 107(2):280-300. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01083-7
  30. Rusin A., Naydenov V., Kudryavtsev A. *Modern lead batteries*. A. Rusina (ed.). St. Petersburg, Petropolis Publ., 2017; 148. (rus).
  31. Barnett G.J. *Vehicle battery fires : why they happen and how they happen*. Warrendale, Pennsylvania, SAE International Ltd., 2017. DOI: 10.4271/R-443
  32. Gorbunov A.S., Vasil'yev A.V., Belyak A.L., Mogil'nikova A.V. The procedure for working out the version about the involvement of a bad connection on the battery terminal of the car in the occurrence of a fire. *Education and Law*. 2021; 10:450-456. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poryadok-otrabotki-versii-o-prichastnostiplohogo-kontakta-na-klemme-akkumulyatornoy-batarei-avtomobilya-k-vozniknoveniyu-pozhara> (rus).
  33. Zhenyu Li, Zhongjie Wang, Liang Wang. Discussion of the relationship between failure and fire of valve regulated lead acid battery. *E3S Web of Conferences*. 2020; 185:01058. DOI: 10.1051/e3s-conf/202018501058
  34. Karasev Ye.V., Taratanov N.A., Churbanov N.B. Forecasting the process of occurrence and development of emergency situations related to fires at construction equipment facilities. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'/Fire and Emergency Safety*. 2021; 21(2):38-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46249438> (rus).
  35. Volkova O.G., Zhorniyak L.B. Investigation of high-current interrupting contacts working surfaces mechanical interaction nature. *Elektrotehnika i elektromekhanika/Electrical engineering and electromechanics*. 2016; 1:12-16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakterov-mehanicheskogo-vzaimodeystviya-rabochih-poverhnostey-silnotochnyh-razryvnyh-kontaktov> (rus).
  36. Anur'yev V.I. *Handbook of the designer-machine builder : in 3 vol. : Vol. 2. 8th ed., rev. and exp. I.N. Zhestkovoy (ed.)*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001; 912. (rus).
  37. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Resistance of Materials : A Tutorial*. Moscow, Nauka Publ, 1986; 560. (rus).
  38. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveyev V.V. *Handbook of Strength of Materials*. Kyiv, Naukova dumka Publ, 1975; 704. (rus).
  39. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Strength calculation of machine parts : handbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979; 702. (rus).
  40. Filin A.P. *Applied mechanics of a solid deformable body. Vol. 1*. Moscow, Nauka Publ., 1975; 832. (rus).
  41. Zhidkov A.V., Lyubimov A.K. *Plane problems of the theory of elasticity : study guide*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University Publ., 2019; 38. (rus).
  42. Struzhanov V.V., Burmasheva N.V. *Theory of elasticity: basic provisions : tutorial*. Ekaterinburg, Ural feder. un-t, 2019; 204. (rus).
  43. Hans Georg Hahn. *Elastizitatstheorie. Grundleger der linearen Theorie und Anwendungen auf eindimensionale, ebene und raumliche Probleme*. B.G. Teubner Stuttgart, 1985. (ger).
  44. Kats A.M. *Theory of elasticity*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2002; 208. (rus).
  45. Skripnyak Ye.G., Zhukova T.V., Skripnyak V.A. *Mathematical formulation of problems of the linear theory of elasticity : tutorial*. Tomsk, TGU Publ, 2005; 26. (rus).
  46. Kiselev V.A. *Plane problem of the theory of elasticity : tutorial*. Moscow, Vysshaya shkola Publ, 1976; 151. (rus).
  47. Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity*. Trans. from English. M.I. Reitman. G.S. Shapiro (ed.). Moscow, Nauka Publ., 1975; 576. (rus).
  48. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analytical methods in contact problems of the theory of elasticity : Monograph*. Moscow, Fizmatlit Publ, 2004; 299. (rus).
  49. Boyarshinov S.V. *Fundamentals of structural mechanics of machines : Textbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1973; 456. (rus).
  50. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Mathematics handbook for engineers and students in higher technical education*. 13th ed. Moscow, Nauka Publ., Fizmatgiz Publ., 1986; 544. (rus).
  51. Berent V.Y. Electroerosion of electric contacts. *Russian Railway Science Journal*. 2016; 75(2):88-96. (rus).
  52. Lyutov V.P., Shlykov D.A. Optical microscopy as a source of expert errors. *Entsiklopediya sudebnoy ekspertizy: nauchno-prakticheskiy zhurnal/Encyclopedia of Forensic Science: Scientific and Practical Journal*. 2016; 11(4). URL: [http://proexpertizu.ru/theory\\_and\\_practice/703/](http://proexpertizu.ru/theory_and_practice/703/) (rus).

Поступила 23.11.2022, после доработки 05.12.2022;  
принята к публикации 02.02.2023

Received November 23, 2022; Received in revised form December 5, 2022;

Accepted February 2, 2023

**Информация об авторах**

**НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; РИНЦ ID: 1137774; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

**АБДЕЕВ Борис Масгутович**, канд. техн. наук, профессор «Школы архитектуры, строительства и дизайна», Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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

**Information about the authors**

**Alexandr I. NEDOBITKOV**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, East Kazakhstan Technical University, Serikbaeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ID RSCI: 1137774; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

**Boris M. ABDEEV**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Architectural and Civil Engineering Department, East Kazakhstan Technical University, Serikbaeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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

## Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя

Любим Николаевич Прытков , Николай Михайлович Барбин, Станислав Андреевич Титов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Атомные электростанции Российской Федерации вырабатывают около 20 % доли общей электроэнергии. На базе реакторов на быстрых нейтронах в качестве теплоносителя, где применяется натрий, Госкорпорацией «Росатом» реализуется проект «Прорыв», нацеленный на реализацию замкнутого ядерного топливного цикла за счет применения энергетического потенциала природного урана. Изучение и обобщение информации о пожарной и радиационной опасности натриевого теплоносителя является актуальной задачей для обеспечения безопасности при эксплуатации реакторов данного типа.

**Цели и задачи.** Целью статьи является аналитическое исследование информации о радиационной и пожарной опасности натриевого теплоносителя, опубликованной в отечественной и зарубежной научной литературе. Для ее достижения проведен анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире, рассмотрены теплоносители, применяемые в быстрых реакторах. Проведен системный анализ радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, представлены сравнительные диаграммы по показателям радиационных свойств радионуклидов, определены наиболее опасные для человека радионуклиды, присутствующие в натриевом теплоносителе. Проанализированы пожарная опасность металлического натрия и особенности тушения пожаров, связанных с утечкой натриевого теплоносителя в первом и втором контуре реакторной установки.

**Результаты и их обсуждение.** На данный момент в мире эксплуатируется 1 опытно-промышленный реактор на быстрых нейтронах, находящийся в России, 1 экспериментальный реактор в Индии и в Китае. В качестве теплоносителя на данных реакторах применяется натрий. В результате анализа литературы из открытых источников установлено, что основными источниками образования примесей в металлическом теплоносителе являются защитный газ, конструкционные и технологические материалы установки и продукты ядерных реакций. Проведенный системный анализ свойств радионуклидов, присутствующих в металлическом теплоносителе, позволил определить наиболее опасные из них для жизни и здоровья человека. Пожарная опасность натриевого теплоносителя обусловлена в основном его химической активностью. Основными способами тушения разлитого натрия является изолирование от кислорода за счет засыпания лужи металлического натрия порошком огнегасящим МГС, порошкообразным оксидом алюминия или уменьшение концентрации кислорода в воздухе ниже 4 % за счет объемного газового пожаротушения азотом, углекислотой или инертными газами.

**Выводы.** В результате проведенного анализа радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах, установлено, что наиболее опасными для человека являются  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ . По результатам анализа пожарной опасности радиоактивного натрия установлены наиболее распространенные огнетушащие вещества и описаны особенности тушения пожаров, возникающих при возгорании натриевого теплоносителя.

**Ключевые слова:** пожар; радионуклид; примеси; огнетушащий состав; тушение пожара; выброс радиоактивности

**Для цитирования:** Прытков Л.Н., Барбин Н.М., Титов С.А. Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 33–43. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43

 Прытков Любим Николаевич, e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

## Radiation and fire hazard of sodium coolant

Lyubim N. Prytkov , Nikolay M. Barbin, Stanislav A. Titov

Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

**ABSTRACT**

**Introduction.** Nuclear power plants in the Russian Federation produce about 20 % of the total electricity. On the basis of fast neutron reactors using sodium as a coolant, Rosatom State Corporation is implementing the “Breakthrough” project aimed at the implementation of a nuclear fuel cycle using the energy potential of natural uranium. Study and generalization of information about fire and radiation hazards of sodium coolant is an urgent task to ensure safety in the operation of this type of reactors.

**Goals and objectives.** The purpose of the article is an analytical study of information about sodium coolant radiation and fire hazard, published in domestic and foreign scientific literature. To achieve it, an analysis of fast neutron reactors operating in the world was carried out, the coolants used in fast reactors were considered. System analysis of radionuclides present in sodium coolant has been carried out, comparative diagrams according to radionuclide radiation properties are presented, the most dangerous radionuclides for humans present in the sodium coolant have been identified. The fire hazard of sodium metal and peculiarities of extinguishing fires associated with the leakage of sodium coolant in the primary and secondary circuits of the reactor plant are analyzed.

**Results and its discussion.** At the present time, there is 1 experimental-industrial fast neutron reactor in operation in the world, located in Russia, and 1 experimental reactor in India and China. Sodium is used as a coolant in these reactors. As a result of the literature analysis from open sources, it was found that the main sources of impurities in the metal coolant are protective gas, structural and technological materials of the installation, and products of nuclear reactions. A systematic analysis of the properties of radionuclides present in the metal coolant made it possible to determine the most dangerous of them for human life and health. The fire hazard of sodium coolant is mainly due to its chemical activity. The main ways of extinguishing spilled sodium is isolation from oxygen by covering the puddle of metallic sodium with powdered fire-extinguishing MHS, powdered aluminum oxide or reduction of oxygen concentration in the air below 4 % by volume gas extinguishing with nitrogen, carbon dioxide or inert gases.

**Conclusions.** As a result of the analysis of radionuclides present in the sodium coolant of a fast neutron reactor, it was found that the most dangerous for people are  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ . Based on the results of the analysis of the fire hazard of radioactive sodium, the most common fire extinguishing agents are established and the features of extinguishing fires that occur when a sodium coolant ignites are described.

**Keywords:** fire; radionuclide; impurities; fire extinguishing composition; fire extinguishing; release of radioactivity

**For citation:** Prytkov L.N., Barbin N.M., Titov S.A. Radiation and fire hazard of sodium coolant. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):33-43. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43 (rus).

✉ Lyubim Nikolaevich Prytkov, e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

**Введение**

Около 20 % доли электроэнергии в Российской Федерации вырабатывается на атомных электростанциях, которые вносят значительный вклад в борьбу с глобальным потеплением, предотвращая выброс в атмосферу порядка 100 млн тонн  $\text{CO}_2$ . Всего на территории России эксплуатируется 37 энергоблоков, из которых 22 энергоблока с реакторами типа ВВЭР (4 энергоблока с ВВЭР-1200, 13 энергоблоков с ВВЭР-1000 и 5 энергоблоков с ВВЭР-440 различных модификаций); 11 энергоблоков с канальными реакторами (8 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 и 3 энергоблока с ЭПП-6); 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) и 2 реакторные установки типа КЛТ-40С в составе плавучей атомной теплоэлектростанции. Общая электрическая мощность 11 атомных электростанций России составляет 29,5 ГВт [1].

Основу мировой ядерной энергетики в настоящее время составляют реакторы на тепловых нейтронах. К основным преимуществам тепловых реакторов можно отнести:

- большой опыт, накопленный в ходе эксплуатации;
- высокий уровень безопасности;

- высокий уровень коммерческой реализации данных типов АЭС.

Основным минусом технологии реакторов на тепловых нейтронах является применение урана-235 в качестве топлива, который составляет порядка 0,7 % в природном уране, оставшиеся 99,3 % составляет уран-238, который для тепловых реакторов не может применяться в качестве ядерного топлива, так как практически не делится в спектре тепловых нейтронов, а проблема обращения с отработавшим ядерным топливом не позволяет однозначно отнести ядерную энергетику к разряду устойчивых.

Всего в недрах нашей планеты имеется около 10–14 млн тонн урана, порядка 4 млн из них уже израсходовано.

По мнению экспертов, при работе только реакторов на тепловых нейтронах, которые составляют сегодня основу мировой ядерной энергетики, уже к концу XXI в. запасы урана-235 исчерпаются, следовательно, атомная энергетика, построенная только на основе тепловых реакторов, имеет такой же недостаток, что и традиционная энергетика на органическом топливе — исчерпаемость топливных ресурсов.

В реакторе на быстрых нейтронах основным делящимся материалом является плутоний-239, кото-

рый образуется из урана-238 при захвате нейтрона, при этом возможна наработка плутония в количествах, превышающих потребности самого реактора, поэтому реакторы на быстрых нейтронах называют размножителями.

Таким образом, реакторы на быстрых нейтронах дают возможность практически полного использования энергетического потенциала природного урана.

Эти два типа реакторов могут успешно работать в единой системе, в которой реакторы на быстрых нейтронах будут осуществлять расширенное воспроизводство топлива с вовлечением плутония, накапливаемого в тепловых реакторах, а также в перспективе трансмутировать минорные актиниды, являющиеся наиболее опасными радиоактивными отходами.

В связи с этим следует отметить, что внедрение реакторов на быстрых нейтронах является условием, способствующим развитию крупномасштабной ядерной энергетики.

При эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах возможно решить важнейшую задачу — создание замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), при котором переработка отработавшего ядерного топлива будет циклически повторяться и будет создаваться на основе выделенного плутония новое топливо для атомной энергетики.

Решение этой задачи позволит:

- осуществить расширенное воспроизводство уран-плутониевого топлива с вовлечением в него плутония, накапливаемого и в тепловых реакторах, а также оружейного плутония, увеличив эффективность использования природного урана в ~100 раз;
- выделить радиоактивные отходы тепловых и быстрых реакторов, образующиеся в процессе ядерных реакций;
- обеспечить в перспективе выжигание наиболее опасных радиоактивных отходов — трансурановых элементов (изотопов нептуния, америция, кюрия с большим периодом полураспада).

Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных реакторов с учетом опыта чрезвычайных ситуаций и инцидентов на данных объектах [2–7] является чрезвычайно актуальной задачей.

С учетом вышесказанного целью настоящей статьи является аналитическое исследование информации о радиационной и пожарной опасности натриевого теплоносителя, опубликованной в отечественной и зарубежной научной литературе.

Для достижения указанной цели в рамках статьи необходимо провести анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире, и теплоносителей, применяемых в данных реакторах. Провести системный анализ радионуклидов, при-

сутствующих в натриевом теплоносителе, их радиационных свойств, определить наиболее опасные радионуклиды для здоровья человека. Проанализировать пожарную опасность металлического натрия и особенности его тушения при утечке в первом и втором контуре реакторной установки.

### **Анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире**

Перспективность применения реакторов на быстрых нейтронах изучалась во многих странах, в СССР в 1955 г. был запущен первый экспериментальный реактор на быстрых нейтронах БР-1, на котором впервые в мире была экспериментально доказана возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива. На основании данных с официального сайта Физико-энергетического института имени А.И. Лейпунского, быстрые реакторы, работающие в мире на данный момент, представлены в табл. 1.

Компоновка АЭС на быстрых нейтронах обычно является интегральной, при которой все элементы первого контура — реактор, теплообменники, главные циркуляционные насосы расположены в пределах одного корпуса.

### **Теплоносители, применяемые в быстрых реакторах**

Вопрос выбора оптимального теплоносителя для быстрых реакторов исследовался многими учеными во всем мире, так как от выбора оптимального теплоносителя зависит надежная и длительная работа ядерной энергетической установки [8–11]. При выборе теплоносителя учитывалось:

- тип, назначение, параметры установки;
- применяемые конструкционные и технологические материалы;
- влияние теплоносителя на ядерно-физические характеристики активной зоны;
- возможность максимального исключения паразитного захвата нейтронов;
- способность теплоносителя к формированию необходимого для определенного типа реактора спектра нейтронов и росту коэффициента воспроизводства;
- возможные аварийные ситуации, влияние теплоносителя на их развитие и ликвидацию последствий;
- возможные затруднения при проведении обслуживающих и ремонтных работ ядерной установки;
- стоимость теплоносителя, оборудования и материалов для реализации нормального технологического процесса;

**Таблица 1.** Быстрые реакторы, работающие в мире  
**Table 1.** Fast reactors operating in the world

Реактор Reactor	Характеристики реактора Reactor characteristics	Мощность (тепловая/электрическая) Power (thermal/electric)	Топливо Fuel	Страна Country	Годы эксплуатации Years of operation
БОР-60 BOR-60	Исследовательский, петлевой, натрий Research, loop, sodium	55/10	Оксид Oxide	Россия Russia	1969–2020
БН-600 BN-600	Опытно-промышленный, интегральный, натрий Industrial, integrated, sodium	1470/600	Оксид Oxide	Россия Russia	1980–2020
БН-800 BN-800	Опытно-промышленный, интегральный, натрий Industrial, integrated, sodium	2100/800	МОКС Mixed-Oxide fuel	Россия Russia	2016–2043
FBTR	Экспериментальный, интегральный, натрий Experimental, integrated, sodium	40/13,2	Карбид (металл) Carbide (metal)	Индия India	1985–2030
PFBR	Прототип, интегральный, натрий Prototype, integrated, sodium	1250/500	Оксид (металл) Oxide (metal)	Индия India	–
CEFR	Экспериментальный, интегральный, натрий Experimental, integrated, sodium	65/20	Оксид (МОКС) Oxide (Mixed-Oxide fuel)	Китай China	2010–2040
Jojo	Экспериментальный, интегральный, натрий Experimental, integrated, sodium	140/–	Оксид Oxide	Япония Japan	1978–2007
Monju	Прототип, петлевой, натрий Prototype, loopback, sodium	714/280	Оксид Oxide	Япония Japan	1994–1996, 2010

- способность теплоносителей образовывать в значительных количествах изотопы с большим периодом полураспада в результате ядерной реакции и многие другие вопросы.

В ходе исследований было установлено, что вода, органические теплоносители и кремнийорганические соединения были непригодны для быстрых реакторов, в связи с этим в качестве теплоносителей рассматривались жидкие металлы, газы и пар.

Применение в качестве теплоносителя сухого пара имело ряд существенных проблем:

- снижение коэффициента воспроизводства;
- возрастание удельной загрузки топлива;
- серьезные проблемы с аварийным расхолаживанием и теплосъемом в процессе перегрузки топлива.

Среди газов, применяемых в качестве теплоносителя, рассматривалась возможность применения гелия, углекислого газа и тетраоксида диазота  $N_2O_4$ . Существенным преимуществом в случае применения газов в качестве теплоносителя для быстрых реакторов являлось повышение коэффициента воспроизводства по сравнению с натрием.

Однако серьезные проблемы возникали в случае необходимости процесса аварийного расхолаживания и из-за возможной разгерметизации контура.

В результате исследований и поисков оптимального вещества, применяемого в качестве теплоносителя для быстрых реакторов, предпочтение было отдано жидким металлам, а среди них — натрию. Данный выбор объясняется хорошими теплофизическими свойствами натрия, которые позволяют осуществлять интенсивный теплосъем как при нормальном режиме эксплуатации ядерной установки, так и в случае аварийного расхолаживания за счет естественной конвекции.

Применение таких тяжелых жидких металлов как висмут, свинец, олово и их сплавы в качестве теплоносителя имело существенный недостаток, связанный с коррозионной активностью данных металлов по отношению к конструкционным материалам ядерной установки.

Проблема поиска высокотемпературных теплоносителей с наиболее оптимальными параметрами имеет особую важность в связи с процессами интенсификации современных энергетических установок.

Верхний температурный предел применения жидких металлов в качестве теплоносителя определяется исходя из его коррозионного воздействия на материалы конструкции установки, температурой кипения при определенном давлении. Высокие коэффициенты теплоотдачи у жидких металлов значительно превышают коэффициенты теплоотдачи других возможных веществ, которые возможно применить в качестве теплоносителей, что свидетельствует о перспективности применения в качестве теплоносителей жидких металлов.

Жидкометаллические теплоносители нашли применение в ядерной энергетике, в Российской Федерации на Белоярской АЭС успешно функционирует 1 промышленный реактор БН-800. В качестве теплоносителя в данном реакторе применяется металлический натрий. Коммерческий натрий получают при помощи электролиза расплавленного хлорида натрия, с добавлением расплава хлорида кальция для уменьшения температуры плавления [12].

### Примеси в теплоносителе

Примеси в теплоносителе неизбежно присутствуют и могут способствовать образованию отложений на поверхностях установок, повышенным коррозионным эффектам и ухудшению радиационной обстановки на установке.

Допустимые концентрации примесей ограничиваются следующими факторами:

- радиационной обстановкой, создаваемой при взаимодействии примесей с ядерным излучением;
- влиянием на ядерно-физические свойства реактора;
- коррозионным воздействием примесей на конструкционные детали ядерной установки;
- исключением образования отложений примесей на поверхности установки, контактирующей с теплоносителем.

Примеси в теплоносителе разделяются на:

- имеющиеся в исходном теплоносителе;
- появляющиеся в процессе эксплуатации установки в штатном режиме при проведении ремонтных работ и возникающие в результате аварийных ситуаций.

Количество примесей в исходном теплоносителе зависит от технологии производства, используемого сырья и условий хранения до загрузки в ядерную энергетическую установку. Концентрации примесей, появляющихся в теплоносителе в процессе эксплуатации установки со временем, увеличиваются. Основными источниками образования примесей в процессе эксплуатации ядерной установки являются:

- защитный газ;
- конструкционные и технологические материалы установки;

- продукты ядерных реакций;
- имеющиеся неплотности технологического оборудования [13–17].

Содержание примесей в натрии, применяемом в качестве теплоносителя в реакторе EBR-II (Франция), приведено в табл. 2 [18].

Радионуклиды естественного и искусственного происхождения оказывают негативное воздействие на человеческий организм. Ввиду серьезной опасности радионуклидов необходимо иметь представление о характеристиках радиоактивных элементов. На основании справочных данных о примесях в натриевом теплоносителе реактора EBR-II (Франция) [18] проведен системный анализ по определению наиболее опасных для человека радионуклидов из числа примесей в натриевом теплоносителе.

В соответствии с Постановлением<sup>1</sup> радионуклиды делятся на 4 группы радиационной опасности (А, Б, В, Г) в зависимости от параметра минимально значимой суммарной активности (табл. 3).

Системный анализ был проведен на основании свойств радионуклидов, указанных в [19]: период полураспада, средняя энергия характеристического  $\gamma$ - и аннигиляционного излучения, средняя энергия  $\beta$ -излучения, электронов Оже, а также конверсионных электронов.

Свойства радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, представлены в табл. 4.

Наиболее опасными радионуклидами по периоду полураспада являются:  $^{239}\text{Pu}$  — 24 065 лет,  $^{137}\text{Cs}$  — 30 лет,  $^{125}\text{Sb}$  — 2,77 года,  $^{22}\text{Na}$  — 2,602 года,  $^{54}\text{Mn}$  — 312,5 суток,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  — 249,9 суток. Наиболее опасные радионуклиды по периоду полураспада схематично представлены на рис. 1.

Проанализировав среднюю энергию  $\beta$ -излучения, конверсионных электронов и электронов Оже, следует отметить, что наиболее опасными являются:  $^{24}\text{Na}$  — 0,553 МэВ/Бк·с,  $^{22}\text{Na}$  — 0,194 МэВ/Бк·с,  $^{131}\text{I}$  — 0,19 МэВ/Бк·с,  $^{137}\text{Cs}$  — 0,187 МэВ/Бк·с,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  — 0,161 МэВ/Бк·с,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,0993 МэВ/Бк·с. Наиболее опасные радионуклиды средней энергии  $\beta$ -излучения, электронов Оже и конверсионных электронов схематично представлены на рис. 2.

В соответствии с данными о средней энергии характеристического  $\gamma$ - и аннигиляционного излучения радионуклидов можно сделать вывод, что наиболее опасными являются:  $^{24}\text{Na}$  — 4,12 МэВ/Бк·с,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  — 2,74 МэВ/Бк·с,  $^{54}\text{Mn}$  — 0,835 МэВ/Бк·с,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,43 МэВ/Бк·с,  $^{131}\text{I}$  — 0,38 МэВ/Бк·с,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  — 0,158 МэВ/Бк·с. Наиболее опасные радионуклиды по средней энергии характеристического  $\gamma$ - и анни-

<sup>1</sup> Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523–09. Приложение 4 : Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47.

**Таблица 2.** Содержание примесей в натрии в реакторе EBR-II  
**Table 2.** The content of impurities in sodium in the EBR-II reactor

Элемент (радионуклид) Element (radionuclide)	Массовая концентрация, $C \cdot 10^{-4}$ , % Mass concentration, $C \cdot 10^{-4}$ , %
O <sub>2</sub>	1,1
H <sub>2</sub>	0,1
C	0,2
B	0,05
Bi	2,9
Cr	0,02
Fe	0,07
Li	0,0005
Ni	0,04
Si	0,2
Sn	37
Mn	0,005
<sup>22</sup> Na	90 нКи/г 90 nCi/g
<sup>24</sup> Na	2,6 мКи/г 2.6 mCi/g
<sup>54</sup> Mn	0,2 нКи/г 0.2 nCi/g
<sup>110m</sup> Ag	2 нКи/г 2 nCi/g
<sup>113m</sup> I	22 нКи/г 22 nCi/g
<sup>117m</sup> Sn	11 нКи/г 11 nCi/g
<sup>125</sup> Sb	3,6 нКи/г 3.6 nCi/g
<sup>131</sup> I	22 нКи/г 22 nCi/g
<sup>137</sup> Cs	64 нКи/г 64 nCi/g
<sup>210</sup> Po	160 пКи/г 160 pCi/g
<sup>239</sup> Pu	0,3 пКи/г 0.3 pCi/g

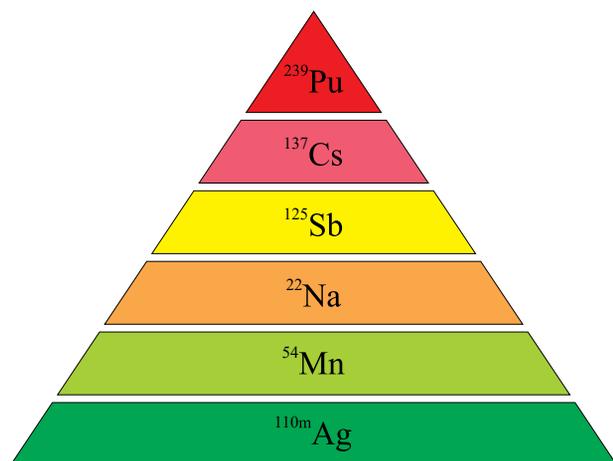
**Таблица 3.** Группы радиационной опасности  
**Table 3.** Radiation hazard groups

Группа Group	Минимально значимая суммарная активность Minimum significant total activity	Нуклид Nuclide
A	$1 \cdot 10^3$ Бк $1 \cdot 10^3$ Bq	–
Б B	$1 \cdot 10^4$ и $1 \cdot 10^5$ Бк $1 \cdot 10^4$ and $1 \cdot 10^5$ Bq	<sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Po, <sup>239</sup> Pu, <sup>24</sup> Na
В C	$1 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^7$ Бк $1 \cdot 10^6$ and $1 \cdot 10^7$ Bq	<sup>110m</sup> Ag, <sup>131</sup> I, <sup>125</sup> Sb, <sup>22</sup> Na, <sup>54</sup> Mn
Г D	$1 \cdot 10^8$ и $1 \cdot 10^9$ Бк $1 \cdot 10^8$ and $1 \cdot 10^9$ Bq	–

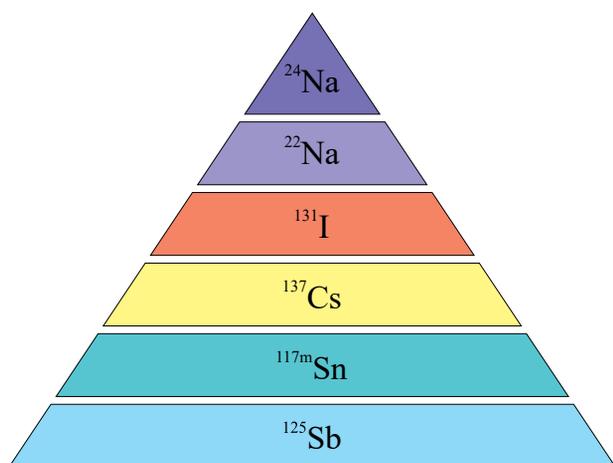
**Таблица 4.** Свойства радионуклидов, присутствующих  
в натриевом теплоносителе

**Table 4.** Properties of radionuclides present in sodium coolant

Нуклид Nuclide	Период полураспада Half life	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк·с Average radiation energy, MeV/Bq·s	
		характеристическое $\gamma$ - и анни- гиляционное излучение characteristic $\gamma$ - and annihilation radiation	$\beta$ -излучение, конверсионные электроны Оже и электроны Оже $\beta$ radiation, conversion electrons and Auger electrons
<sup>22</sup> Na	2,602 года 2.602 years	–	$1,94 \cdot 10^{-1}$
<sup>24</sup> Na	15 ч 15 hours	4,12	$5,53 \cdot 10^{-1}$
<sup>54</sup> Mn	312,5 суток 312.5 days	$8,35 \cdot 10^{-1}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$
<sup>110m</sup> Ag	249,9 суток 249.9 days	2,74	$7,13 \cdot 10^{-2}$
<sup>117m</sup> Sn	13,61 суток 13.61 days	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$
<sup>125</sup> Sb	2,77 года 2.77 years	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$9,93 \cdot 10^{-2}$
<sup>131</sup> I	8,04 суток 8.04 days	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
<sup>137</sup> Cs	30 лет 30 years	–	$1,87 \cdot 10^{-1}$
<sup>210</sup> Po	138,38 суток 138.38 days	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$8,18 \cdot 10^{-8}$
<sup>239</sup> Pu	24 065 лет 24,065 years	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$6,65 \cdot 10^{-3}$



**Рис. 1.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по периоду полураспада  
**Fig. 1.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the half-life



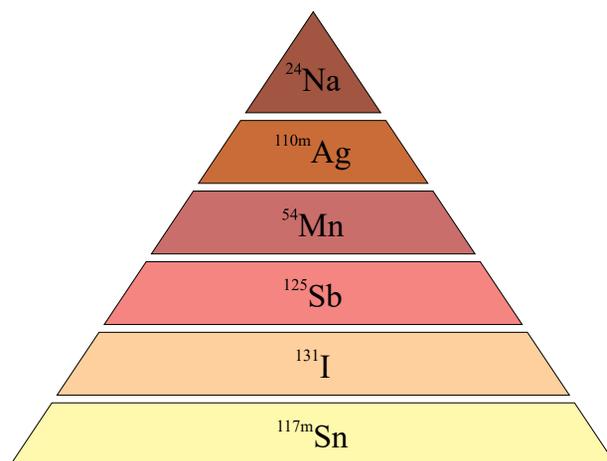
**Рис. 2.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по средней энергии  $\beta$ -излучения, электронов Оже и конверсионных электронов  
**Fig. 2.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the average energy of  $\beta$ -radiation, Auger electrons and conversion electrons

лигационного излучения схематично представлены на рис. 3.

Проведя системный анализ опасности радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, можно сделать вывод, что наибольшую опасность для жизни и здоровья людей представляют следующие радионуклиды:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ .

### Пожарная опасность натриевого теплоносителя

Химическая активность натрия является основной проблемой при его эксплуатации в качестве теплоносителя. Данный металлический теплоноситель взаимодействует со многими металлами при относительно низкой температуре, что связано



**Рис. 3.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по средней энергии характеристического  $\gamma$ - и аннигиляционного излучения  
**Fig. 3.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the average energy of the characteristic  $\gamma$ - and annihilation radiation

с наличием примесей окислов натрия. Предотвратить взаимодействие с цинком, нержавеющей сталью и другими металлами возможно за счет очищения натрия от окислов. Нагревание теплоносителя приводит к взаимодействию с водородом, серой, оксидами некоторых металлов, углеродом и диоксидом кремния. Натриевый теплоноситель не взаимодействует с инертными газами, бензином, парафином и минеральным маслом [20]. Химическая активность натрия с водой и с атмосферой воздуха создает определенные сложности при его тушении.

Возгорание радиоактивного натрия из первого или второго контура реактора является серьезной опасностью для участников тушения пожара ввиду образования высокой концентрации активности в реакторном зале.

В научных работах А.К. Микеева [21, 22] скорость истечения натрия составляет около 10 л/с. Натрий из первого или второго контура реактора воспламеняется в атмосфере воздуха при 280–350 °С. При эксплуатации натриевого теплоносителя его температура составляет от 300 до 550 °С и, как следствие, при попадании в атмосферу воздуха сразу же воспламеняется.

Горение натриевого теплоносителя сопровождается образованием густого белого дыма — до 40 % продуктов горения может перейти в аэрозоли. Основу смеси аэрозолей составляют оксиды натрия, а при значительной влажности воздуха — гидроксид. Химическая активность аэрозольных частиц способствует причинению серьезных повреждений оборудованию, находящемуся в помещении пожара, и представляет особую опасность для человека.

Особенности тушения жидкометаллического натрия рассматриваются в Стандарте и Рекомендациях<sup>2,3</sup>.

В качестве огнетушащих средств натриевого теплоносителя применяются порошковые и газообразные вещества. Порошковые огнетушащие средства, подаваемые на поверхность горящего теплоносителя, изолируют его от кислорода и подавляют горение. Недостатками данных средств являются:

- низкая теплопередача;
- сложность доставки к месту пожара по трубопроводам;
- слеживаемость при хранении;
- поглощение влаги.

Для тушения натриевого теплоносителя наиболее распространенными являются: порошок огнегасящий МГС и порошкообразный оксид алюминия — глинозем. При тушении натрия порошком происходит его смачивание и порошковый состав тонет в луже металла, данный факт способствует большому расходу огнетушащего порошка. Эффективное применение порошковых средств пожаротушения возможно лишь в случае, если толщина слоя разлившегося теплоносителя составляет не более 50 мм. Расход порошка МГС при тушении 1 м<sup>2</sup> натрия толщиной 30–40 мм составляет 8 кг, расход глинозема при аналогичных условиях составляет 60 кг.

Газообразные средства при возгорании металлического натрия прекращают его горение за счет снижения концентрации кислорода ниже 4 %. Эффективность тушения очага пожара газом во многом зависит от герметичности помещения. При экспериментальной проверке газового тушения металлического натрия оказалось, что в результате тушения азотом или аргоном на поверхности металла образуются соединения, снижающие температуру самовоспламенения до 70 °С. Данный недостаток был устранен введением в основной газ углекислоты в объемном содержании 4 % или более. В результате температура самовоспламенения возросла до 260 °С.

### Пожары натриевого теплоносителя на атомных электростанциях

Данные о пожарах натриевого теплоносителя на атомных электростанциях были взяты из учебного пособия [23].

<sup>2</sup> СТО 1.1.1.04.001.1500–2018. Правила пожарной безопасности при эксплуатации атомных станций.

<sup>3</sup> МР 1.3.3.99.0227–2014. Тушение пожара на объектах с обращением жидкометаллического натрия АС с реактором БН. Особенности применения первичных и стационарных средств пожаротушения. Методические рекомендации.

На реакторе БР-5 (СССР) в марте 1959 г. произошел прожог трубопровода 1-го контура за счет дуги, возникшей при замыкании электронагревателей, что привело к выбросу радиоактивного газа и разливу около 2 кг металлического натрия. Данный инцидент был обнаружен за счет показаний уровня и изменения давления аргона в газовой полости насоса 2-го контура. Ликвидация последствий аварии заняла около 1,5 мес. Личный состав, проводивший осмотр места течи и уборку натрия, применял кожаную спецодежду и шлемы с принудительной подачей воздуха.

На Белоярской АЭС (СССР) на реакторе БН-350 21 марта 1973 г. в результате ошибки персонала был включен электрообогрев на замороженном участке трубопровода, отделявшем место ремонта от работающей петли, натрий был подан на разгерметизированный узел петли 2-го контура. Течь составила порядка 20 кг и была устранена закрытием отсечной арматуры узла индикации. Пожар продолжался около 40 мин и был потушен глиноземом.

6 октября 1973 г. при работе реактора из-за недостатков конструкции пробоотборника 2-го контура и ошибки персонала произошел выброс 3–5 кг натрия с возгоранием. При выбросе 2 работника получили ожоги. Течь устранили за счет отключения насоса, сброса давления аргона и дренирования петли. Пожар ликвидировали через 50 мин при помощи глинозема.

16 февраля 1975 г. произошла значительная течь натрия на выходном трубопроводе аварийного испарителя ПГ-5 в районе тройника по 2-му контуру. Утечке предшествовала разгерметизация данного испарителя с возникновением реакции натрия с водой. Из-за ошибочных действий персонала отключение ПГ было неполным и вода продолжала поступать во 2-й контур. В результате взаимодействия натрия с водой при высокой температуре была прожжена стенка трубопровода. Истечение натрия и продуктов взаимодействия с водой сопровождалось возгоранием и было оперативно затушено глиноземом. В процессе реакции натрия с водой выделялся водород, который выходил из отверстия в трубопроводе и горел факелом, длина которого составляла около 20–30 см. Факельное горение продолжалось 2,5 ч. Для тушения данного пожара под струю вытекающего натрия и продуктов реакции устанавливались металлические ящики из-под глинозема, в которых было собрано 300 кг натрия.

С 1980 по 1991 г. на реакторе БН-600 Белоярской АЭС (СССР) было 27 течей натрия. Самая крупная из них произошла 31 декабря 1990 г. в дренажном трубопроводе диаметром 40 мм, при этой аварии вытекло порядка 600 кг натрия. После уборки продуктов горения и изоляции была обнаружена

трещина размером 30 мм, которая образовалась из-за дефекта штуцера и воздействующих эксплуатационных нагрузок.

В декабре 1982 г. в 1-м контуре реактора БН-600 на всасывающем патрубке насоса бакового хозяйства произошла утечка 1 кг натрия. Течь была обнаружена оперативно за счет дозиметрической сигнализации. В 1989 и 1990 г. на одном и том же участке трубопровода выхода натрия из фильтр-ловушки произошли незначительные утечки, которые были обнаружены при помощи дозиметрической сигнализации.

В декабре 1995 г. на АЭС Монжу (Япония) из-за дефекта сварных швов в трубах, перекачивающих натрий, произошла утечка 3 тонн теплоносителя на пол энергоблока, произошел крупный пожар, в результате которого температура в помещении повысилась до нескольких сотен градусов [24].

При анализе данных о пожарах натриевого теплоносителя на атомных электростанциях следует отметить, что ключевым фактором, который способствует уменьшению последствий утечки натриевого теплоносителя, является своевремен-

ность обнаружения, оперативное принятие управленческих решений, направленных на локализацию и ликвидацию горения с минимальной угрозой жизни и здоровью участников тушения.

### Выводы

Проанализировав радионуклиды, присутствующие в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах, были определены наиболее опасные радиоактивные элементы для человека. Данные, полученные в ходе проведения системного анализа радионуклидов, будут использованы для последующих исследований в области радиационной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. По результатам анализа пожарной опасности радиоактивного натрия, применяемого в реакторах на быстрых нейтронах, были определены наиболее распространенные огнетушащие вещества, описаны особенности тушения пожаров, возникающих на ядерных энергетических установках с натриевым теплоносителем.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nuclear power reactors in the world. Vienna : International Atomic Energy Agency. 2022. 102 p.
2. *Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M.* Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. Issue 2. P. 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
3. *Dhillon B.S.* Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants. CRC Press, 2017. Pp. 62–88. DOI: 10.1201/b22260
4. *Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М.* Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75
5. *Nayak A., Kulkarni P.* Severe accidents in nuclear reactors. Woodhead Publishing, 2021. 394 p.
6. *Kumar S.* Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants. Academic Press, 2021. 260 p.
7. *Petrangeli G.* Nuclear safety. Butterworth-Heinemann, 2019. 586 p.
8. *Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Логинов Н.И. и др.* Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 20. DOI: 10.1134/S0040363614050087
9. *Orlov Y.I., Efanov A.D., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Rapovyanets A.K., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V.* Hydrodynamic problems of heavy liquid metal coolants technology in loop-type and mono-block-type reactor installations // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237. Issue 15–17. Pp. 1829–1837. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.008
10. *Асхадуллин Р.Ш., Мартынов П.Н., Рачков В.И., Легких А.Ю., Стороженко А.Н., Ульянов В.В., Гулевский В.А.* Контроль и регулирование содержания кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях для противокоррозионной защиты сталей // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 595–604. DOI: 10.7868/S0040364416040013
11. *Thomson J.R.* High integrity systems and safety management in hazardous industries. Butterworth-Heinemann, 2021. 360 p.
12. *Englander M., Stohr J.A.* Chimie et industrie. 1956. Vol. 75. Issue 2. Pp. 53–60
13. *Носов Ю.В., Ровнейко А.В., Ташильков О.Л., Щеклеин С.Е.* Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН-350, -600 // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 4. С. 195–199.
14. *Kozlov F.A., Alexeev V.V., Zagorul'ko Yu.I., et al.* The summary of the sodium coolant technology development in application to LMFBRs // Working material TM on the Coordinated Project (CRP) Analyses and Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems (Obninsk, February 14–18, 2005). Vienna, IAEA, 2005. Pp. 237–259.
15. *Сорокин А.П., Гулевич А.В., Клинов Д.А., Кузина Ю.А., Камаев А.А., Иванов А.П. и др.* Исследования высокотемпературной ядерной энерго-

- технологии для производства водорода и других инновационных применений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2020. № 1. С. 102–119. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-102-119
16. Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Теплофизика щелочных жидких металлов. Часть 2: Физхимия, технология и инновационные приложения (ретроспективно-перспективный взгляд) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 233–251. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-233-251
  17. Сутягина Р.О., Алексеев В.В., Сутягин И.А. Обзор существующих систем очистки в области жидкометаллических теплоносителей Препринт ФЭИ – 3295. Обнинск, 2021. 53 с.
  18. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль / под ред. Ф.А. Козлова. М. : Энергоатомиздат, 1983.
  19. Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества. Л., 1990. С. 425–459.
  20. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М. и др. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Ч. 1 / под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. Екатеринбург, 2013. 548 с.
  21. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М. : Энергоатомиздат, 1990. 432 с.
  22. Микеев А.К. Пожары на радиационно-опасных объектах. Факты, выводы, рекомендации. М. : ВНИИПО, 2000. 346 с.
  23. Соловьев С.П. Аварии и инциденты на атомных электростанциях / под общ. ред. С.П. Соловьева; учеб. пос. Обнинск : ИАТЭ, 1992. 300 с.
  24. Жаворонков И.С., Ильюшонок А.В. Обеспечение пожарной безопасности атомных электростанций // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2. № 3. С. 343–350.

## REFERENCES

1. *Nuclear power reactors in the world*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2022; 102.
2. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 666(2):022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
3. Dhillon B.S. *Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants*. CRC Press, 2017; 62-88. DOI: 10.1201/b22260
4. Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):66-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75 (rus).
5. Nayak A., Kulkarni P. *Severe accidents in nuclear reactors*. Woodhead Publishing, 2021; 394.
6. Kumar S. *Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants*. Academic Press, 2021; 260.
7. Petrangeli G. *Nuclear safety*. Butterworth-Heinemann, 2019; 586.
8. Rachkov V.I., Arnoldov M.N., Efanov A.D., Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Loginov N.I., et al. Use of liquid metals in nuclear, thermonuclear power engineering and other innovative technologies. *Teploenergetika*. 2014; 5:20. DOI: 10.1134/S0040363614050087
9. Orlov Y.I., Efanov A.D., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Papovyants A.K., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V. Hydrodynamic problems of heavy liquid metal coolants technology in loop-type and mono-block-type reactor installations. *Nuclear Engineering and Design*. 2007; 237(15-17):1829-1837. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.008
10. Askhadullin R.Sh., Martynov P.N., Rachkov V.I., Legkikh A.Yu., Storozhenko A.N., Ul'yanov V.V., Gulevskiy V.A. Monitoring and control of the oxygen content in heavy liquid-metal coolants for anticorrosion protection of steels. *Thermal Physics of High Temperatures*. 2016; 54(4):595-604. DOI: 10.7868/S0040364416040013
11. Thomson J.R. *High integrity systems and safety management in hazardous industries*. Butterworth-Heinemann, 2021; 360.
12. Englander M., Stohr J.A. *Chimie et industrie*. 1956; 75(2):53-60.
13. Nosov Yu.V., Rovneiko A.V., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Features of fast reactors decommissioning БН-350, -600. *Atomic Energy*. 2018; 125(4):195-199.
14. Kozlov F.A., Alexeev V.V., Zagorul'ko Yu.I., et al. The summary of the sodium coolant technology development in application to LMFBRs. *Working material TM on the Coordinated Project (CRP) Analyses and Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems. Obninsk, 14–18 February 2005*. Vienna, IAEA, 2005; 237-259.
15. Sorokin A.P., Gulevich A.V., Klinov D.A., Kuzina Yu.A., Kamaev A.A., Ivanov A.P., et al. Studies of high-temperature nuclear energy technology for hydrogen production and other innovative applications. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear reactor constants*. 2020; 1:102-119. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-102-119
16. Kuzina Yu.A., Sorokin A.P. Thermal physics of alkaline liquid metals. Part 2: Physical chemistry, technology and innovative applications (retrospective-perspective view). *Questions of Atomic Science and Technology*.

- Series: Nuclear reactor constants.* 2019; 3:233-251. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-233-251
17. Sutyagina R.O., Alekseev V.V., Sutyagin I.A. *Review of existing purification systems in the field of liquid metal coolants Preprint FEI-3295.* Obninsk, 2021; 53.
  18. Kozlov F.A., Volchkov L.G., Kuznetsov E.K., Matyukhin V.V. *Liquid-metal coolants of nuclear power plants. Purification from impurities and their control.* F. Kozlov (ed.). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983.
  19. Bazhenov V.A., Buldakov L.A., Vasilenko I.Ya. Harmful chemicals. *Radioactive Substances.* Leningrad, 1990; 425-459.
  20. Beltyukov A.I., Karpenko A.I., Poluektov S.A., Tashlykov O.L., Titov G.P., Tuchkov A.M., et al. *Nuclear power plants with sodium-cooled fast neutron reactors. Part 1.* S.E. Shchekleina, O.L. Tashlykova (ed.). Ekaterinburg, 2013; 548.
  21. Mikeev A.K. *Fire protection of nuclear power plants.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990; 432.
  22. Mikeev A.K. *Fires at radiation-hazardous objects. Facts, conclusions, recommendations.* Moscow, VNIPO, 2000; 346.
  23. Solovyov S.P. *Accidents and incidents at nuclear power plants : textbook.* S.P. Solovyov (ed.). Obninsk, IATE, 1992; 300.
  24. Zhavoronkov I.S., Ilyushonok A.V. Ensuring fire safety of nuclear power plants. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus.* 2018; 2(3):343-350.

Поступила 17.02.2023, после доработки 06.03.2023;

принята к публикации 20.03.2023

Received February 17, 2023; Received in revised form March 6, 2023;

Accepted March 20, 2023

### Информация об авторах

**ПРЫТКОВ Любим Николаевич**, адъюнкт, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 1105831; ORCID: 0000-0002-8047-5174; e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

**БАРБИН Николай Михайлович**, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 31647; Scopus AuthorID: 6701448034; ResearcherID: AGQ-1655-2022; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**ТИТОВ Станислав Андреевич**, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors

**Lyubim N. PRYTKOV**, Adjunct, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; SPIN-Code: 8849-2525; ID RSCI: 1105831; ORCID: 0000-0002-8047-5174; e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

**Nikolay M. BARBIN**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 31647; Scopus AuthorID: 6701448034; ResearcherID: AGQ-1655-2022; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**Stanislav A. TITOV**, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

## Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций

Татьяна Юрьевна Еремина<sup>1</sup>, Денис Александрович Минайлов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> 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.** Применение вспучивающегося огнезащитного покрытия (далее ВОП) обосновывается разработкой проекта огнезащиты, учитывающего данные по его огнезащитной эффективности, оцениваемой в условиях воздействия стандартного температурного режима, применение которых может привести к закладыванию в проект завышенного запаса по огнестойкости или к недооценке теплового воздействия на стальные строительные конструкции с огнезащитой ВОП в условиях реального пожара.

**Цели и задачи.** Цель исследования — оценить влияние температурного режима пожара на эффективность ВОП. Для решения поставленной цели были решены следующие задачи: произведена оценка температурного режима пожара в помещении при различной пожарной нагрузке на примере складского здания; проведены эксперименты по оценке влияния различного теплового потока, приведенной толщины металла и толщины ВОП на его эффективность по плану полного факторного эксперимента типа 2.

**Методы.** Для математического моделирования реальных температурных пожаров применялся программный комплекс Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующий полевую (дифференциальную) математическую модель. Для исследования влияния полученных температурных режимов пожара на эффективность ВОП были проведены эксперименты по плану полного факторного эксперимента типа 2. В качестве образцов для испытаний были выбраны металлические пластины из углеродистой стали размерами 100 × 100 мм с приведенной толщиной 3 и 4,5 мм и окрашенные однокомпонентным ВОП на органической основе толщиной 0,25 и 0,5 мм. Для оценки влияния теплового потока применялась радиационная панель с возможностью регулирования лучистого теплового потока плотностью от 10 до 50 кВт/м<sup>2</sup>.

**Результаты и обсуждение.** В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что тепловое воздействие, оказываемое на стальные строительные конструкции во время пожара, может существенно отличаться от стандартного температурного режима как в большую, так и в меньшую сторону. Результаты эксперимента показали, что на время прогрева испытательных образцов наибольшее влияние из рассматриваемых факторов (величина теплового потока, приведенная толщина металла, толщина ВОП) оказала величина теплового потока, так как был получен наибольший по абсолютной величине коэффициент уравнения регрессии.

**Вывод.** Предположение о возможной недооценке теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме на огнестойкость стальных строительных конструкций с огнезащитой ВОП подтвердилось при проведении испытаний.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование; Fire Dynamics Simulator (FDS); огнестойкость стальных строительных конструкций; тепловой поток; пожарная нагрузка; приведенная толщина металла

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект: Теоретическое и экспериментальное проектирование новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз № FSWG-2020-0007)

**Для цитирования:** Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 44–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

# Research of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent coating designed for fire protection of steel structures

Tatyana Yu. Eremina<sup>1</sup>, Denis A. Minailov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> 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 usage of intumescent coating (hereinafter referred to as IC) is justified by the development of a fire protection project, taking into account the data on its fire protection efficiency, estimated under the influence of standard temperature conditions, the usage of which can lead to overestimating the fire resistance margin in the project or underestimating the thermal impact on the steel building structures with IC fire protection in conditions of a real fire.

**Aims and purposes.** The purpose of the study is to evaluate the effect of fire temperature conditions on the effectiveness of IC. To achieve this goal, the following tasks were carried out: a temperature mode of fire in a building under different fire loads by the example of a warehouse building was estimated; experiments to estimate the influence of different heat fluxes, reduced thickness of metal and IC thickness on its effectiveness by the full factor experiment of the type 2 were conducted.

**Methods.** To mathematically simulate real temperature fires, the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package, which implements a field (differential) mathematical model, was used. To study the effect of the obtained fire temperature regimes on the effectiveness of IC, experiments were carried out according to the plan of a complete factor experiment type 2. The test specimens were carbon steel metal plates with dimensions of 100 × 100 mm with reduced thickness of 3 and 4.5 mm and painted with 0.25 and 0.5 mm organic-based single-component IC. A radiant heat flux panel with a radiant heat flux density of 10 to 50 kW/m<sup>2</sup> was used to assess the effects of heat flux.

**Results and discussion.** In the course of numerical experiments in the FDS software package, it was found that the thermal impact on steel building structures during a fire can differ significantly from the standard temperature regime, both upwards and downwards. The results of the experiment showed that the heating time of the test samples had the greatest influence of the actors under consideration (the value of the heat flux, the reduced thickness of the metal, the thickness of IC) had the value of the heat flux, as the largest absolute value of the regression equation was obtained.

**Conclusion.** The assumption of possible underestimation of the thermal effect under “standard” temperature conditions on the fire resistance of steel building structures with IC fire protection was confirmed by the tests.

**Keywords:** computer modelling; Fire Dynamics Simulator (FDS); fire resistance of steel building structures; heat flux; fire load; reduced thickness of metal

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project: Theoretical and experimental design of new composite materials for safe operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats No. FSWG-2020-0007)

**For citation:** Eremina T.Yu., Minailov D.A. Research of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent coating designed for fire protection of steel structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):44-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58 (rus).

✉ Denis Aleksandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Введение

В настоящее время строительство и эксплуатация зданий на стальном каркасе, согласно статистическим данным МЧС России<sup>1</sup>, сопровождается систематическим проявлением пожароопасных ситуаций с гибелью людей и значительным материальным ущербом (табл. 1).

Сегодня для обеспечения предела огнестойкости стальных строительных конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения

широко используют различные вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ВОП) [1–4] (рис. 1).

Для обоснования применения ВОП согласно СП 2.13130.2020<sup>2</sup> разрабатывается проект огнезащиты, учитывающий экспериментальные данные по огнезащитной эффективности ВОП, а также результаты прочностных и теплотехнических расчетов стальных строительных конструкций с ВОП. Проведение теплотехнических расчетов стальных строительных конструкций с ВОП производится

<sup>1</sup> Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.

<sup>2</sup> СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

**Таблица 1.** Статистические данные пожаров в промышленных и общественных зданиях  
**Table 1.** Statistical data on fires in industrial and public buildings

Назначение зданий Purpose of buildings	Количество пожаров, ед./% от общего количества Number of fires, units/% of the total number Прямой материальный ущерб, тыс. руб./% от общего ущерба Direct material damage, thousand rubles/% of total damage Погибло, чел./% от общего количества погибших Killed, people/% of the total number of deaths									
	2017		2018		2019		2020		2021	
Производственные Production	2786	2,10	2813	2,13	3546	0,75	3438	0,78	3589	0,92
	974 317	7,08	1 343 463	8,66	2 089 945	11,50	7 132 712	34,17	1 783 532	10,98
	59	0,75	71	0,90	72	0,84	83	1,00	110	1,30
Складские Warehouse	1427	1,07	1402	1,06	1589	0,34	1501	0,34	1462	0,37
	2 749 853	19,97	817 317	5,27	5 057 354	27,83	3 458 591	16,57	2 848 908	17,53
	25	0,32	20	0,25	23	0,27	16	0,19	17	0,20
Предприятия торговли Trade enterprises	2688	2,02	2632	2,00	2754	0,58	2620	0,60	2668	0,68
	1 784 318	12,96	3 917 681	25,25	1 110 042	6,11	845 755	4,05	1 265 341	7,79
	17	0,22	11	0,14	2	0,02	10	0,12	14	0,17
Сервисное обслуживание населения Public Service	968	0,73	988	0,75	1194	0,25	1143	0,26	1155	0,30
	226 177	1,64	250 898	1,62	191 689	1,05	259 565	1,24	154 938	0,95
	7	0,09	5	0,06	8	0,09	8	0,10	4	0,05
Административные Administrative	740	0,56	799	0,61	867	0,18	855	0,19	805	0,21
	130 095	0,94	175 100	1,13	145 677	0,80	156 348	0,75	94 606	0,68
	12	0,15	15	0,19	13	0,15	3	0,04	10	0,12
Для культурно- досуговой деятельности For cultural and leisure activities	233	0,18	272	0,21	351	0,07	278	0,06	252	0,06
	76 792	0,56	69 175	0,45	85 793	0,47	467 614	2,24	79 117	0,49
	3	0,04	61	0,77	1	0,01	1	0,01	0	0,00

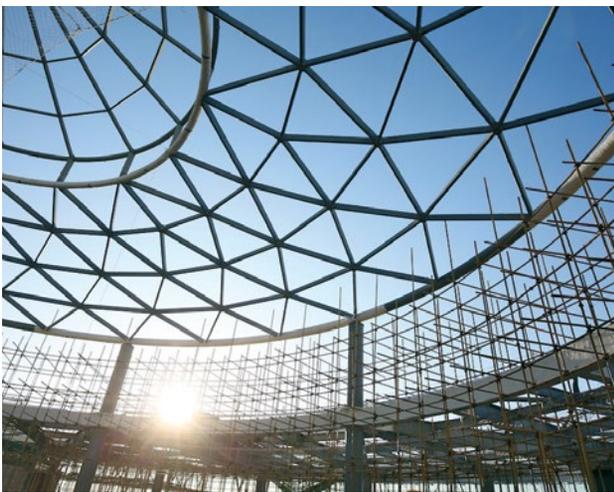
на основании теплотехнических характеристик ВОП, полученных по результатам стандартных огневых испытаний. В настоящее время проведение обязательных огневых испытаний с целью определения огнезащитной эффективности ВОП осуществляется по ГОСТ Р 53295–2009<sup>3</sup> с Изменениями 1 в условиях воздействия «стандартного температурного режима» по ГОСТ 30247.0<sup>4</sup>, по результатам которых путем решения обратной задачи теплопроводности можно получить теплотехнические характеристики ВОП. ГОСТ Р 53295–2009<sup>2</sup> также допускает проведение огневых испытаний ВОП на добровольной основе в условиях воздействия медленно развивающегося (тлеющего) пожара. Однако производители ВОП, как правило, не проводят таких испытаний, так как они носят рекомендательный характер.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. ГОСТ 30247.0–94.

<sup>4</sup> ГОСТ 30247.0. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования.

Из литературы [1, 4–17] известно, что на огнезащитную эффективность ВОП как при проведении лабораторных испытаний, так и при эксплуатации могут влиять различные факторы и воздействия, основные из которых условно можно разделить на слабо воздействующие, средне воздействующие и сильно воздействующие (табл. 2).

При разработке проекта огнезащиты стальных строительных конструкций для каждого объекта защиты учесть влияние действующих на объекте факторов воздействия на огнезащитную эффективность ВОП по данным стандартных огневых испытаний весьма проблематично, так как для этой цели нужны зависимости изменения огнезащитной эффективности от влияния действующих факторов. Поэтому для получения таких зависимостей нужно проведение дополнительных огневых испытаний по расширенной программе, требующей значительных затрат, сил и средств. При этом при проведении испытаний факторы воздействия должны соответствовать определенным требованиям, т.е. они должны быть управляемыми (значение нужного фактора должно под-

*a**b**c**d*

**Рис. 1.** Применение ВОП для огнезащиты стальных строительных конструкций: *a* — складские здания; *b* — торговые центры; *c* — спортивные сооружения; *d* — железнодорожные станции  
**Fig. 1.** IC applications for fire protection of steel building structures: *a* — warehouse buildings; *b* — shopping malls; *c* — sports facilities; *d* — railway stations

держиваться постоянным в течение всего опыта), однозначными, совместимыми, независимыми при обеспечении требуемой точности измерений факторов. Несоответствие вышеперечисленным требованиям делает невозможным получение достоверных зависимостей огнезащитной эффективности от факторов воздействия, действующих на объекте защиты, при проведении огневых испытаний. При планировании эксперимента необходимо составить список факторов, которые могут оказать влияние на огнезащитную эффективность ВОП на объекте защиты и которые не учитывались при проведении стандартных огневых испытаний по ГОСТ Р 53295–2009<sup>2</sup>.

Из табл. 1 следует, что при эксплуатации ВОП на объекте защиты основными факторами, воздействующими на огнезащитную эффективность, являются температурно-влажностные условия эксплуатации и температурный режим реального пожара. Оценка

влияния температурно-влажностных условий эксплуатации на огнезащитные свойства ВОП на объекте защиты оценивается в основном при помощи разрушающих методов контроля [18, 19]. Данные методы позволяют контролировать огнезащитные свойства ВОП в течение всего срока его службы с некоторыми допущениями. Влияние температурного режима пожара на огнезащитную эффективность при применении этих методов контроля не учитывается.

Цель настоящего исследования — оценка влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценить температурный режим пожара в помещении при различной пожарной нагрузке на примере типового складского здания;

**Таблица 2.** Сравнение факторов и воздействий, влияющих на огнезащитную эффективность ВОП  
**Table 2.** Comparison of factors and influences affecting the fire-retardant effectiveness of IC

Фактор воздействия Impact factor	Степень влияния факторов и воздействий на ВОП Degree of influence of factors and influences on IC		
	Слабо Weak	Средне Middle	Сильно Strong
<i>При лабораторных испытаниях In laboratory tests</i>			
Способ нанесения (ручной, механизированный) Method of application (manual, mechanized)	+	–	–
Наличие защитно-декоративного покрытия Availability of protective and decorative coating	–	+	–
Приведенная толщина металла Reduced metal thickness	–	+	–
Толщина покрытия Coating thickness	–	–	+
Коэффициент вспучивания (химический состав покрытия) Swelling coefficient (chemical composition of the coating)	–	–	+
Адгезия (марка грунта, химический состав, качество поверхности) Adhesion (soil grade, chemical composition, surface quality)	–	–	+
Стабильность пенококса (плотность, устойчивость к осыпанию, образование трещин, «сползание») Stability of foam cox (density, resistance to crumbling, cracking, “sliding”)	–	–	+
<i>При эксплуатации (хранение, нанесение, срабатывание при пожаре) During operation (storage, application, fire response)</i>			
Условия хранения и транспортировки Storage and transportation conditions	–	–	+
Температурно-влажностные условия эксплуатации Temperature and humidity operating conditions	–	–	+
Срок годности Shelf life	–	–	+
Срок эксплуатации Lifetime	–	–	+
Температурный режим реального пожара Temperature regime of a real fire	–	–	+

- провести эксперименты по оценке влияния теплового потока пожара, приведенной толщины металла и толщины ВОП на эффективность ВОП;
- по результатам экспериментов построить математическую модель зависимости эффективности ВОП от величины теплового потока, толщины ВОП, приведенной толщины металла.

### Методы

Моделирование температурных режимов реальных пожаров осуществлялось при помощи программного комплекса Fire Dynamics Simulation (FDS), реализующего полевую математическую модель. В качестве объекта исследования было выбрано типо-

вое складское здание размерами 12 × 12 м и высотой 6,5 м. Несущие элементы здания — стальные конструкции. Покрытие — плоская кровля на металлических балках и фермах покрытия. В здании предусмотрены ворота размером 4 × 4 м в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1 × 2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами 0,7 × 1 м [20].

Объектом, моделирующим пожарную нагрузку в программном комплексе FDS, принималось вентиляционное отверстие. Для оценки температуры на поверхности стальных конструкций были установлены датчики (термопары) с шагом 1 м, также измерялась среднеобъемная температура на высоте 4,7–6,5 м. При проведении расчетов ворота здания были открыты, окна закрыты.

В качестве пожарной нагрузки по справочным данным<sup>5</sup> [21] были приняты: промтовары (текстильные изделия); резинотехнические изделия (резина и изделия из нее); склад льноволокна; склад оргстекла; этиловый спирт; кабели и провода (0,75 (АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС)); хлопок разрыхленный; склад бумаги в рулонах; тара (древесина, картон, полистирол); радиоматериалы, индустриальное масло, склад хлопка в тюках.

Для исследования влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП были поставлены эксперименты по плану ПФЭ 2<sup>3,6</sup>, причем каждый эксперимент повторялся по три раза. В качестве рассматриваемых факторов, влияющих на эффективность ВОП, были выбраны: тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>; приведенная толщина металла, мм; толщина ВОП, мм. Каждый из анализируемых факторов рассматривался лишь на двух фиксированных уровнях (верхнем, обозначаемом знаком «+», и нижнем, обозначаемом знаком «-»):

$z_1$  — тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>:  $z_1^- = 40$ ,  $z_1^+ = 50$ ;

$z_2$  — приведенная толщина металла, мм:  $z_2^- = 3$ ,  $z_2^+ = 4,5$ ;

$z_3$  — толщина огнезащитного вспучивающегося покрытия, мм:  $z_3^- = 0,25$ ,  $z_3^+ = 0,5$ .

Матрица планирования проведения экспериментов указана в табл. 3.

Построение математической модели (функции  $y = f(z_1, z_2, z_3)$ ), называемой уравнением регрессии

Таблица 3. Матрица планирования ПФЭ 2<sup>3</sup>  
Table 3. CFE Planning Matrix 2<sup>3</sup>

Номер эксперимента Experiment number	Исследуемые факторы Factors to be studied		
	$z_1$	$z_2$	$z_3$
1	+	+	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	-

<sup>5</sup> Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М., Самошин Д.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности»: для определения расчетных значений пожарного риска в зданиях, строениях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.

<sup>6</sup> Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент // Методические указания для самостоятельной работы студентов. Новосибирск : НГАВТ, 2010. 36 с.

и связывающей эффективность ВОП с рассматриваемыми факторами, лежащими в интервале между верхним и нижним уровнями, осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Все изучаемые факторы кодировались (табл. 4).

2. Для обработки полученных по результатам испытаний данных была построена матрица планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий (табл. 5).

3. Были вычислены коэффициенты уравнения регрессии  $b_i$ .

4. Вычисленные коэффициенты уравнения регрессии  $b_i$  были проверены на значимость, после чего было получено уравнение регрессии в кодированных переменных.

Проверка полученных коэффициентов на значимость проводилась с помощью критерия Стьюдента по условию: если  $|b| < t_{кр} \cdot S_k$ , то  $b$  незначим и его полагали равным нулю в уравнении регрессии. Критическую точку  $t_{кр}$  находили из таблиц распределения Стьюдента [22] по числу степеней свободы  $n(m - 1)$  и с заданным уровнем значимости  $\alpha$  для случая двухсторонней критической области.

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_k$  вычислялось по формуле:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{nm}}. \quad (1)$$

Дисперсию воспроизводимости  $S_{\{y\}}^2$  вычисляли по формуле:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (2)$$

где  $n$  — число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);

Таблица 4. Кодирование факторов  
Table 4. Coding factors

Факторы Factors	Верхний уровень $z_i^+$ Upper level $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$ Lower level $z_i^-$	Центр $z_i^0$ Center $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$ Variation interval $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of the encoded variable on the natural variable
$z_1$	$z_1^+$	$z_1^-$	$z_1^0$	$\lambda_1$	$x_1 = \frac{z_1 - z_1^0}{\lambda_1}$
$z_2$	$z_2^+$	$z_2^-$	$z_2^0$	$\lambda_2$	$x_2 = \frac{z_2 - z_2^0}{\lambda_2}$
$z_3$	$z_3^+$	$z_3^-$	$z_3^0$	$\lambda_3$	$x_3 = \frac{z_3 - z_3^0}{\lambda_3}$

Таблица 5. Матрица планирования для обработки результатов  
Table 5. Planning matrix for processing the results

Номер эксперимента Experiment number	Факторы Factors			Взаимодействия Interaction				Результаты опытов Results of experiments			Среднее результатов Average results
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_j$
1	+	+	+	+	+	+	+	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$	$\bar{y}_1$
2	-	+	+	-	-	+	-	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$	$\bar{y}_2$
3	+	-	+	-	+	-	-	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_{33}$	$\bar{y}_3$
4	-	-	+	+	-	-	+	$y_{41}$	$y_{42}$	$y_{43}$	$\bar{y}_4$
5	+	+	-	+	-	-	-	$y_{51}$	$y_{52}$	$y_{53}$	$\bar{y}_5$
6	-	+	-	-	+	-	+	$y_{61}$	$y_{62}$	$y_{63}$	$\bar{y}_6$
7	+	-	-	-	-	+	+	$y_{71}$	$y_{72}$	$y_{73}$	$\bar{y}_7$
8	-	-	-	+	+	+	-	$y_{81}$	$y_{82}$	$y_{83}$	$\bar{y}_8$

$m$  — число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте;

$y_{ji}$  — результат отдельного  $i$ -го наблюдения в  $j$ -м эксперименте;

$\bar{y}_j$  — среднее выборочное значение наблюдений для  $j$ -го эксперимента.

5. Полученное уравнение регрессии было проверено на адекватность.

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществлялась с помощью критерия Фишера по условию: если  $F_{\text{рас}} < F_{\text{таб}}$ , то уравнение адекватно, в противном случае — неадекватно.

Расчетное значение критерия  $F_{\text{рас}}$  определили по формуле:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{ост}}^2$  — остаточная дисперсия;

$S_{\{y\}}^2$  — дисперсия воспроизводимости.

Остаточную дисперсию  $S_{\text{ост}}^2$  вычисляли по формуле:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (4)$$

где  $m$  — число опытов в каждом эксперименте;

$n$  — число экспериментов;

$r$  — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

$\tilde{y}_j$  — значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для  $j$ -го эксперимента;

$\bar{y}_j$  — среднее выборочное значение наблюдений для  $j$ -го эксперимента.

Табличное значение критерия Фишера  $F_{\text{таб}}$  находили из таблиц критических точек распределения Фишера по заданному уровню значимости  $\alpha$  и по соответствующим степеням свободы  $k_1 = n - r$  и  $k_2 = n(m - 1)$ . Степень свободы  $k_1$  соответствует степени свободы числителя формулы (3) — остаточной дисперсии  $S_{\text{ост}}^2$ , а  $k_2$  — степень свободы знаменателя формулы (3) — дисперсии воспроизводимости  $S_{\{y\}}^2$ .

6. Была произведена интерпретация полученной математической модели.

Интерпретация полученной модели производилась в кодированных переменных, так как в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов и по величине коэффициентов можно судить о степени влияния того или иного фактора, т.е. чем больше абсолютная величина коэффициента, тем больше фактор влияет на изучаемый параметр. Следовательно, можно расположить факторы по величине их влияния. Знак «+» у коэффициента свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора растет величина отклика, а при знаке «минус» — убывает.

7. Было получено уравнение регрессии в натуральных переменных.

Для получения математической модели в натуральных переменных  $z_i$  в уравнение регрессии вместо  $x_i$  подставляли их выражения из формул, указанных в табл. 3. При переходе к натуральным переменным коэффициенты уравнения изменяются, и в этом случае пропадает возможность интерпретации влияния факторов по величинам и знакам коэффициентов.



**Рис. 2.** Радиационная панель  
Fig. 2. Radiant panel

Для оценки влияния теплового потока на характеристики вспучивающихся покрытий применялась радиационная панель (рис. 2), предназначенная для испытания строительных материалов на возгораемость с целью определения характеристики воспламенения строительных материалов по ГОСТ 9.402<sup>7</sup>.

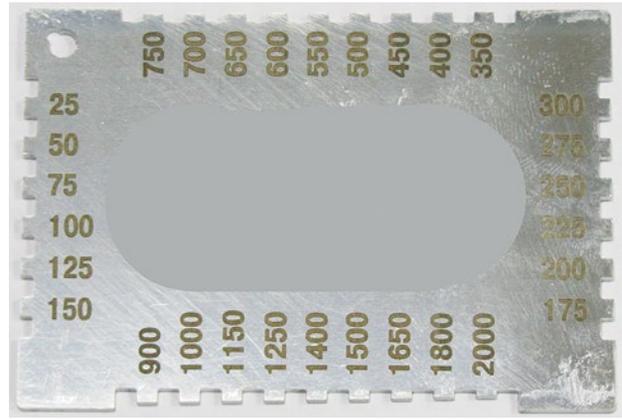
Образцы, используемые для испытаний, представляют собой металлические пластины из углеродистой стали размерами 100 × 100 мм с приведенной толщиной 3 и 4,5 мм.

Поверхность металлических пластин перед окраской была подготовлена по ГОСТ 9.402<sup>4</sup>, а затем огрунтована. В качестве грунтовочного покрытия применялся грунт ГФ-021. Затем металлические пластины были окрашены вспучивающимся покрытием на органической основе толщиной 0,25 и 0,5 мм.

Для определения толщины мокрого слоя краски применялась прямоугольная металлическая гребенка (рис. 3). Для измерения толщины сухого слоя покрытия применялся магнитный толщиномер неразрушающего контроля ТМ-4 (рис. 4). Точки замеров толщины сухого слоя краски показаны на рис. 5.

Измерение толщины сухого слоя покрытия проводилось в 16 точках. За результат принималось среднее арифметическое значение всех измерений, которое определялось в соответствии с ГОСТ Р 53295 (с Изм. 1). При этом среднее квадратичное отклонение  $S(\bar{X})$  не превышало 20 % от результатов измерений, а погрешность измерений не превышала  $\pm 0,02T$ , где  $T$  — измеряемая толщина покрытия.

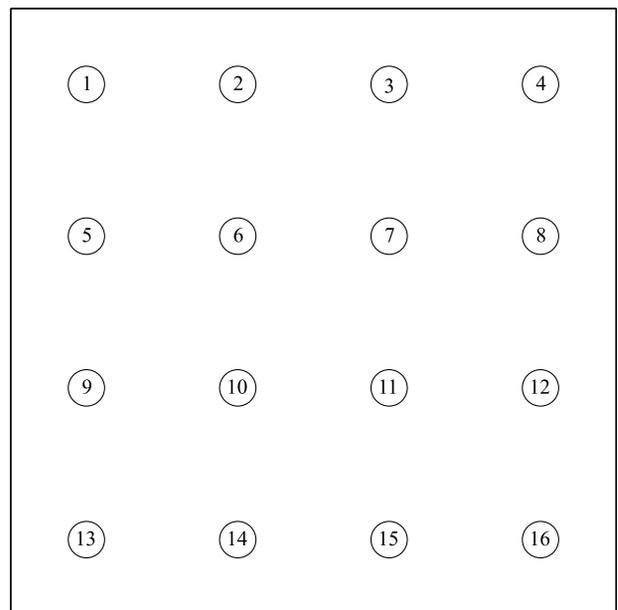
Температура стальных образцов контролировалась двумя термопарами ТХА (К) № 1 и № 2 (рис. 6), установленными на обогреваемой поверхности. Относительно стальных образцов термопары были



**Рис. 3.** Металлическая гребенка  
Fig. 3. Metal comb



**Рис. 4.** Толщиномер покрытий ТМ-4  
Fig. 4. Thickness gauge of coatings ТМ-4



**Рис. 5.** Точки замеров толщины сухого слоя краски на образцах  
Fig. 5. Points of measurement of the thickness of the dry layer of paint on the samples

<sup>7</sup>ГОСТ 9.402. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

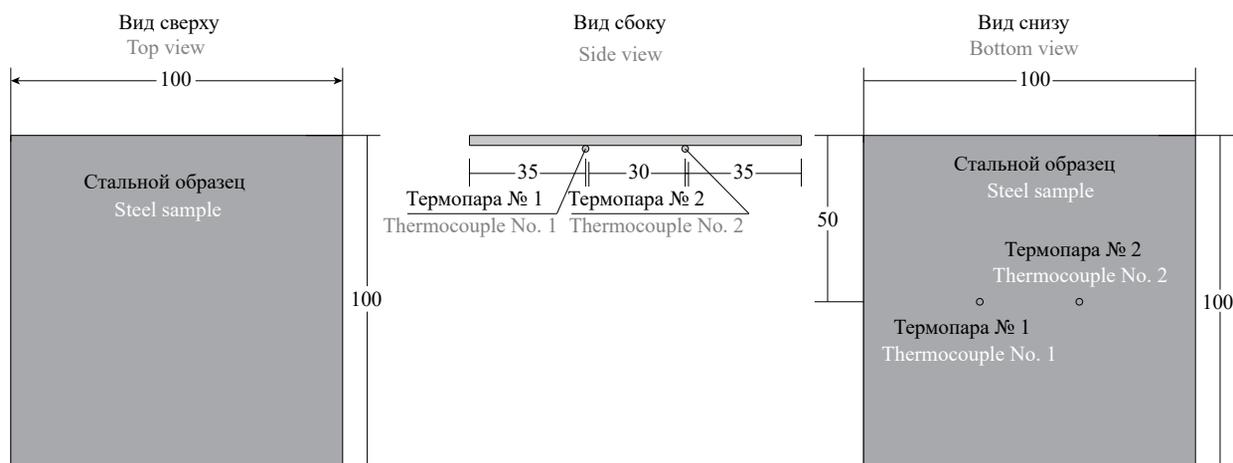


Рис. 6. Расположение термопар на стальных образцах  
Fig. 6. Location of thermocouples on steel samples

размещены по центру на расстоянии 30 мм друг от друга.

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования температурного режима пожара в помещении представлены на рис. 7 и 8.

По результатам численного моделирования видно, что температурные режимы пожара могут значительно отличаться от стандартного температурного режима, а их влияние на эффективность ВОП не может быть оценено только по результатам

стандартных огневых испытаний без проведения дополнительных испытаний.

Результаты проведения экспериментов по плану полного факторного эксперимента  $2^3$  представлены в табл. 6.

Для каждого фактора были найдены интервалы варьирования и зависимость кодированной переменной  $x_i$  от натуральной  $z_i$  (табл. 7).

Матрица планирования обработки результатов представлена в табл. 8.

Полученные по результатам расчета коэффициенты уравнения регрессии представлены в табл. 9.

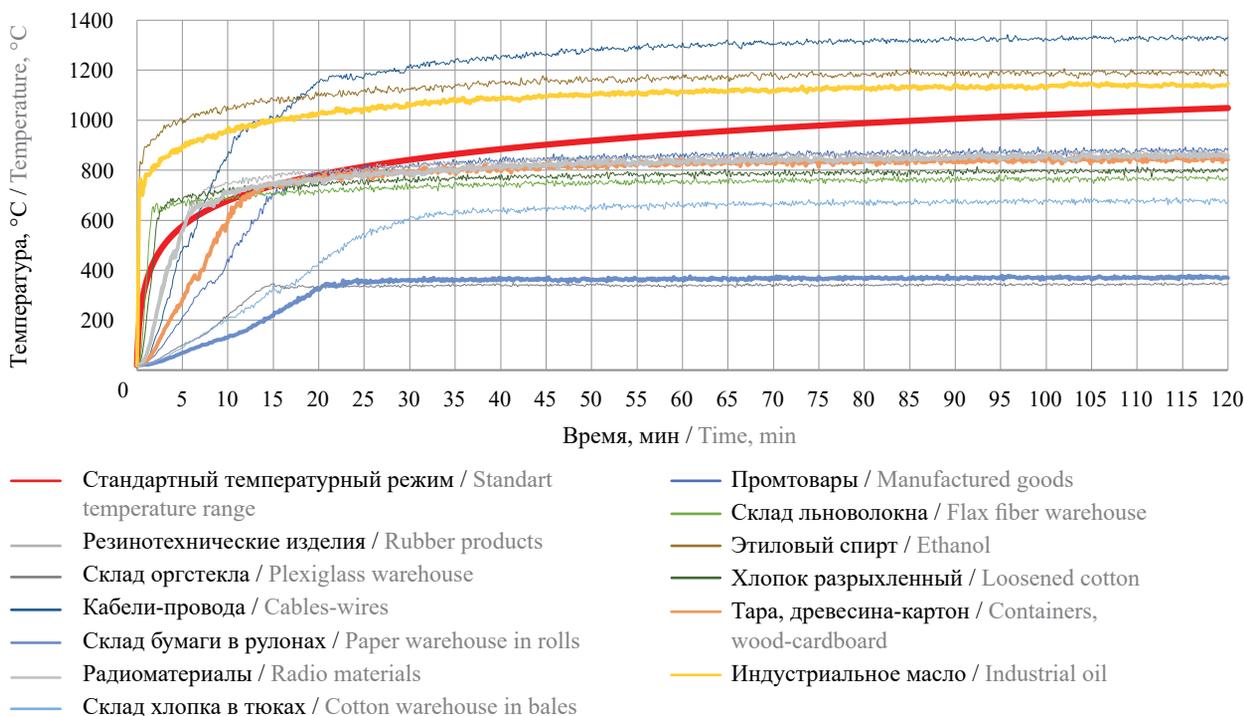
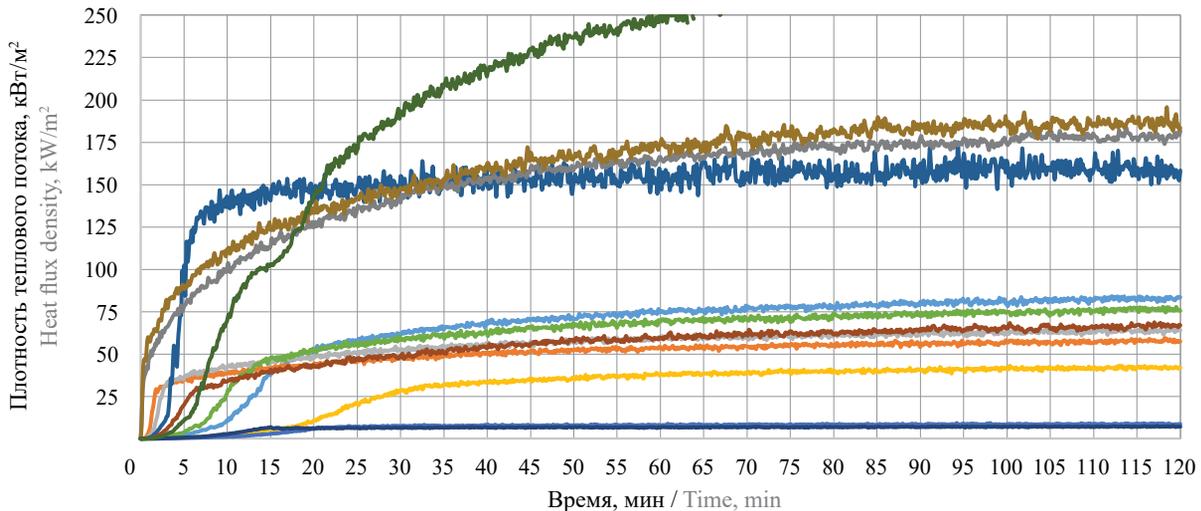


Рис. 7. Результаты численного моделирования температурного режима в помещении [21]  
Fig. 7. Results of numerical simulation of the temperature regime in the room [21]



- Промтовары / Manufactured goods
- Хлопок разрыхленный / Loosened cotton
- Склад бумаги в рулонах / Paper warehouse in rolls
- Резинотехнические изделия / Rubber products
- Индустриальное масло / Industrial oil
- Склад оргстекла / Plexiglass warehouse
- Склад льноволокна / Flax fiber warehouse
- Склад хлопка в тюках / Cotton warehouse in bales
- Тара древесина / Wood containers
- Радиоматериалы / Radio materials
- Этиловый спирт / Ethanol
- Кабели-провода / Cables-wires

**Рис. 8.** Величина теплового потока, кВт/м<sup>2</sup>, соответствующая полученным по результатам моделирования температурным режимам пожара [20]

**Fig. 8.** The value of the heat flux, kW/m<sup>2</sup>, corresponding to the temperature conditions of the fire obtained from the results of the simulation [20]

Расчет выборочных дисперсий представлен в табл. 10.

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$   $t_{кр} = 2,12$ . Следовательно,

$t_{кр}S_k = 2,12 \cdot 0,32 = 0,68$ . Сравнение  $t_{кр}S_k$  с коэффициентами уравнения регрессии представлено на рис. 9.

Сравнивая полученное значение  $t_{кр}S_k = 0,68$  с коэффициентами уравнения регрессии, представленными на рис. 9, видим, что все коэффициенты, кроме  $b_{1,2}$  и  $b_{1,2,3}$ , больше по абсолютной величине 0,68. Следовательно, все коэффициенты, кроме  $b_{1,2}$  и  $b_{1,2,3}$ , значимы.

**Таблица 6.** Результаты экспериментов  
**Table 6.** Results of experiments

Номер эксперимента Experiment number	Исследуемые факторы Factors to be studied			Результаты опытов* Results of experiments*		
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	+	+	+	58,3	56,1	61,4
2	-	+	+	87,1	91,3	89,2
3	+	-	+	50,3	49,2	48,5
4	-	-	+	80,1	78,4	77,1
5	+	+	-	26,2	24,6	25,7
6	-	+	-	59,8	57,1	58,3
7	+	-	-	18,7	19,4	20,5
8	-	-	-	55	56,8	54,2

\* За результат эксперимента принималось время достижения металлической пластины температуры 500 °С на необогреваемой стороне.

\* The time for the metal plate to reach 500 °C on the unheated side was taken as the result of the experiment.

**Таблица 7.** Кодирование факторов  
**Table 7.** Coding Factors

Факторы Factors	Верхний уровень $z_i^+$ Upper level $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$ Lower level $z_i^-$	Центр $z_i^0$ Center $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$ Variation interval $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of the encoded variable on the natural variable
$z_1$	50	40	45	5	$x_1 = \frac{z_1 - 45}{5}$
$z_2$	4,5	3	3,75	0,75	$x_2 = \frac{z_2 - 3,75}{0,75}$
$z_3$	0,5	0,25	0,375	0,125	$x_3 = \frac{z_3 - 0,375}{0,125}$

**Таблица 8.** Матрица планирования для обработки результатов  
**Table 8.** Planning matrix for processing results

Номер эксперимента Experiment number	Факторы Factors			Взаимодействия Interaction				Результаты опытов Results of experiments			Среднее результатов Average results $\bar{y}_j$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	+	+	+	+	58,3	56,1	61,4	58,60
2	-	+	+	-	-	+	-	87,1	91,3	89,2	89,20
3	+	-	+	-	+	-	-	50,3	49,2	48,5	49,33
4	-	-	+	+	-	-	+	80,1	78,4	77,1	78,53
5	+	+	-	+	-	-	-	26,2	24,6	25,7	25,50
6	-	+	-	-	+	-	+	59,8	57,1	58,3	58,40
7	+	-	-	-	-	+	+	18,7	19,4	20,5	19,53
8	-	-	-	+	+	+	-	55,2	56,8	54,2	55,40

Полагая  $b_{1,2} = 0$  и  $b_{1,2,3} = 0$ , получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 54,31 - 16,07x_1 + 3,61x_2 + 14,6x_3 + 1,12x_1x_3 + 1,37x_2x_3. \quad (5)$$

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществлялась с помощью критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера  $F_{таб}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  по соответству-

**Таблица 9.** Коэффициенты уравнения регрессии  
**Table 9.** Regression equation coefficients

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$
54,31	-16,07	3,61	14,60	0,20	1,12	1,37	-0,55

**Таблица 10.** Расчет выборочных дисперсий  
**Table 10.** Calculation of sample variances

$j$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{cp}$ $y_{med}$	$(y_1 - y_{cp})^2$ $(y_1 - y_{med})^2$	$(y_2 - y_{cp})^2$ $(y_2 - y_{med})^2$	$(y_3 - y_{cp})^2$ $(y_3 - y_{med})^2$	$S_j^2$	$\Sigma S_j^2$	$S_{y_2}$	$S_{S_c}$ $S_c$
1	58,3	56,1	61,4	58,60	0,0900	6,2500	7,8400	7,09000	19,63	2,45	0,32
2	87,1	91,3	89,2	89,20	4,4100	4,4100	0,0000	4,41000			
3	50,3	49,2	48,5	49,33	0,9344	0,0178	0,6944	0,82333			
4	80,1	78,4	77,1	78,53	2,4544	0,0178	2,0544	2,26333			
5	26,2	24,6	25,7	25,50	0,4900	0,8100	0,0400	0,67000			
6	59,8	57,1	58,3	58,40	1,9600	1,6900	0,0100	1,83000			
7	18,7	19,4	20,5	19,53	0,6944	0,0178	0,9344	0,82333			
8	55,2	56,8	54,2	55,40	0,0400	1,9600	1,4400	1,72000			

ющим степеням свободы  $k_1 = n - r = 8 - 6 = 2$  и  $k_2 = n(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$  составляет 3,63.

Определение расчетного значения критерия Фишера представлено в табл. 11.

Так как  $F_{рас} = 1,64 < F_{таб} = 3,63$ , то полученное уравнение регрессии (5) адекватно.

По полученному уравнению регрессии (5) видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор  $x_1$  (величина теплового потока), так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент (-16,07). После него по силе влияния на эффективность ВОП идут: толщина ВОП (14,6); приведенная толщина металла (3,61); взаимодействие факторов: приведенная толщина металла и толщина ВОП (1,37); взаимодействие факторов: величина теплового потока и толщина ВОП (1,12). Так как коэффициенты  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$  — положительны, то с увеличением этих факторов и их взаимодействий увеличивается время прогрева опытных образцов до температуры 500 °С. Коэффициент

**Таблица 11.** Расчетное значение критерия Фишера  $F_{рас}$   
**Table 11.** Calculated value of the Fisher criterion  $F_{est}$

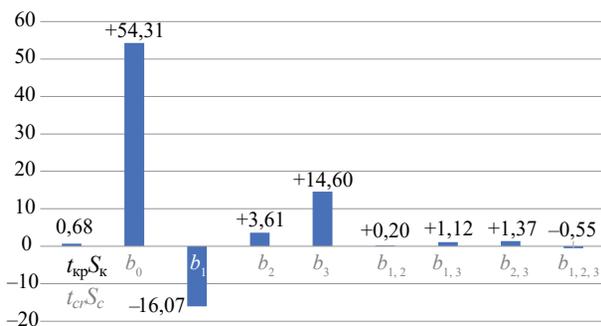
Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	$S_{ост}^2$ $S_{r,d}^2$	$F_{рас}$ $F_{est}$
$\tilde{y}_1$	58,95	$\bar{y}_1$	58,60	$(\tilde{y}_1 - \bar{y}_1)^2$	0,1225	4,04	1,64
$\tilde{y}_2$	88,85	$\bar{y}_2$	89,20	$(\tilde{y}_2 - \bar{y}_2)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_3$	48,98	$\bar{y}_3$	49,33	$(\tilde{y}_3 - \bar{y}_3)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_4$	78,88	$\bar{y}_4$	78,53	$(\tilde{y}_4 - \bar{y}_4)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_5$	24,76	$\bar{y}_5$	25,50	$(\tilde{y}_5 - \bar{y}_5)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_6$	59,14	$\bar{y}_6$	58,40	$(\tilde{y}_6 - \bar{y}_6)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_7$	20,28	$\bar{y}_7$	19,53	$(\tilde{y}_7 - \bar{y}_7)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_8$	54,66	$\bar{y}_8$	55,40	$(\tilde{y}_8 - \bar{y}_8)^2$	0,5501		

$x_1$  — отрицательный, это означает, что с увеличением фактора  $x_1$  время прогрева опытных образцов уменьшается.

Для получения математической модели в натуральных переменных  $z_i$  в уравнение регрессии (5) вместо  $x_i$  подставляли их выражения из формул, указанных в табл. 7. Полученное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 54,31 - 16,07 \frac{z_1 - 45}{5} + 3,61 \frac{z_2 - 3,75}{0,75} + 14,6 \frac{z_3 - 0,37}{0,125} + 1,12 \frac{z_1 - 45}{5} \cdot \frac{z_3}{0,125} + 1,37 \frac{z_2 - 3,75}{0,75} \cdot \frac{z_3 - 0,4}{0,125} \quad (6)$$

По полученному уравнению регрессии (6) можно определить значения времени прогрева стальных пластин до 500 °С, не проводя эксперимента и придавая факторам (величина теплового потока, приведенная толщина металла, толщина краски) значения, которые должны лежать между нижним и верхним уровнем.



**Рис. 9.** Коэффициенты уравнения регрессии в сравнении с  $t_{кр} S_k$   
**Fig. 9.** Coefficients of the regression equation in comparison with  $t_{cr} S_k$

### Выводы

В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что тепловое воздействие, оказываемое на стальные строительные конструкции во время пожара, может существенно отличаться от стандартного температурного режима как в большую, так и в меньшую сторону.

Оценка влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП показала, что величина теплового потока при проведении испытаний оказала наибольшее влияние на время прогрева стальных пластин. Так, по полученному уравнению регрессии (5) видно, что фактор  $x_1$  (величина теплового потока) имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент (-16,07). После него по силе влияния на эффективность ВОП идут: толщина ВОП (14,6); приведенная толщина металла (3,61); взаимодействие факторов: приведенная толщина металла и толщина ВОП (1,37); взаимодействие факторов: величина теплового потока и толщина ВОП (1,12). Так как коэффициенты  $x_2, x_3, x_1 x_3, x_2 x_3$  — положительны, то с увеличением этих факторов и их взаимодействий увеличивается время прогрева опытных образцов до температуры 500 °С. Коэффициент  $x_1$  — отрицательный, это означает, что с увеличением фактора  $x_1$  время прогрева опытных образцов уменьшается.

Из полученных результатов исследования можно сделать вывод, что проводимая при проектировании оценка соответствия пределов огнестойкости стальных строительных конструкций с ВОП, требуемым Федеральным законом № 123-ФЗ<sup>8</sup>, при стандартном температурном режиме без учета особенности

<sup>8</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

пожарной нагрузки и зависимости эффективности ВОП от величины теплового потока в ряде случаев может привести к недооценке теплового воздействия

и занижению фактической огнестойкости, что отрицательно сказывается на пожарной безопасности складских зданий.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Обзор рынка средств огнезащиты металлоконструкций. Преимущества и недостатки различных видов // Огнезащита XXI века : мат. Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2014.
2. Пехотиков А.В. и др. Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // Евростройпрофи. 2015. № 79. С. 34–38.
3. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures / NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
4. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
5. De Masi R.F., Ruggiero S., Vanoli G.P. Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate // Solar Energy. 2018. Vol. 169. Pp. 468–487. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.021
6. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes // Fires and Incidents: Prevention, Accident Response. 2021. Vol. 3. Pp. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
7. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios // Safety Science. 2021. Vol. 144(0925). P. 105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
8. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building information modelling for performance-based fire safety engineering analysis — A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42. P. 102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
9. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service // Journal of Safety Research. 2019. Vol. 69. Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
10. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 159. Issue 10. P. 106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
11. Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rock-rose under severe drought conditions // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
12. Zhang T., Xi J., Qiu S., Zhang B., Luo Z., Xing W., et al. Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety // Journal of Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 604. Pp. 378–389. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.135
13. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42. P. 102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
14. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 159. Issue 10. P. 106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
15. Gatheeshgar P., Keerthan P., Thamboo J., Roy K. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist // Structures. 2021. Vol. 30. Pp. 1071–1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
16. Roy K., Lim J.B.P., Lau H.H., Yong P.M., Clifton G.C., Johnston P.D., et al. Collapse behaviour of a fire engineering designed single-storey cold-formed steel building in severe fires // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 142. Pp. 340–357. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.046
17. Kumar A., Roy K., Uzzaman A., Lim J.B.P. Finite element analysis of unfastened cold-formed steel channel sections with web holes under end-two-flange loading at elevated temperatures // Advanced Steel Construction 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 231–242.
18. Ерёмин Т.Ю., Минайлов Д.А. Гармонизация российских и международных нормативных документов по оценке огнестойкости строительных конструкций (основные подходы к проведению огневых испытаний) // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 151–155.
19. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings IAPE'19. Oxford, United Kingdom.

20. Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65
21. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пос. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
22. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пос. для вузов. 10-е изд., стер. М. : Высшая школа, 2004. 479 с.

## REFERENCES

- Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Obzor grazhnoezaschita flaevozaschitametallokonstruksii. Advantages and disadvantages of various types. *Fire Protection of the XXI Century : Materials of the All-Russian Scientific Practical Conference*. Moscow, 2014. (rus).
- Pekhotikov A.V., et al. Topical issues in changes means of fire protection for steel constructures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38.
- Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. *White paper on fire behavior of steel structures / NIST GCR 15-984*. Gaithersburg, Maryland, NIST Publ., 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
- Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
- De Masi R.F., Ruggiero S., Vanoli G.P. Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Ex-perimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate. *Solar Energy*. 2018; 169:468-487. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.021
- Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and Incidents: Prevention, Accident Response*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
- Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios. *Safety Science*. 2021; 144(0925):105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
- Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
- Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service. *Journal of Safety Research*. 2019; 69:53-60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
- Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
- Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal*. 2019; 108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
- Zhang T., Xi J., Qiu S., Zhang B., Luo Z., Xing W., et al. Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021; 604:378-389. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.135
- Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
- Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
- Gatheeshgar P., Keerthan P., Thamboo J., Roy K. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist. *Structures*. 2021; 30:1071-1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
- Roy K., Lim J.B.P., Lau H.H., Yong P.M., Clifton G.C., Johnston P.D., et al. Collapse behaviour of a fire engineering designed single-storey cold-formed steel building in severe fires. *Thin-Walled Structures*. 2019; 142:340-357. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.046
- Kumar A., Roy K., Uzzaman A., Lim J.B.P. Finite element analysis of unfastened cold-formed steel channel sections with web holes under end-two-flange loading at elevated temperatures. *Advanced Steel Construction*. 2021; 17(3):231-242.
- Eremina T.Y., Minailov D.A. Harmonization of the Russian and international normative documents on assessment of fire resistance of structures (key approaches to carrying out fire tests). *Fire safety*. 2014; 32:151-155. (rus).
- Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. *New method for quality control of fire protective coatings IAPE'19*. Oxford, United Kingdom.

20. Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering warehouse buildings in conditions of different temperature effects. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3): 54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65 (rus).
21. Koshmarov Y.A. *Predicting indoor fire hazards : a training manual*. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, 2000; 118. (rus).
22. Gmurman V.E. *Probability theory and mathematical statistics : studies. Manual for universities. 10th ed., ster.* Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004; 479. (rus).

*Поступила 15.11.2022, после доработки 26.01.2023;  
принята к публикации 10.02.2023*

*Received November 15, 2022; Received in revised form January 26, 2023;*

*Accepted February 10, 2023*

### Информация об авторах

**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 AuthorID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

**МИНАЙЛОВ Денис Александрович**, начальник сектора, 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: 1128904; Scopus AuthorID: 57207307581; ResearcherID: AAI-2064-2020; ORCID: 0000-0001-9811-3908; e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Вклад авторов:

**Еремина Т.Ю.** — научное руководство, концепция исследования.

**Минайлов Д.А.** — проведение исследования, написание исходного текста и доработка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors

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

**Denis A. MINAILOV**, Head of the Research Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1128904, Scopus AuthorID: 57207307581; ResearcherID: AAI-2064-2020; ORCID: 0000-0001-9811-3908, e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Contributions of the authors:

**Tatyana Yu. Eremina** — scientific guidance, research concept.

**Denis A. Minailov** — research, writing the source text and finalizing the text of the article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 59–70  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):59-70

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70>

## Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий

Андрей Владимирович Пехотиков<sup>1</sup>, Роман Анатольевич Ивашук<sup>2</sup>,  
Александр Васильевич Гомозов<sup>1</sup>✉, Сергей Алексеевич Лучкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> ООО «Желдорпроект», г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Противопожарная защита лестничных клеток играет ключевую роль в обеспечении безопасности людей в секционных жилых зданиях, поскольку блокирование пожаром единственной лестничной клетки делает невозможной безопасную эвакуацию людей из всех квартир секции и осложняет вероятность их спасения.

Современные нормативы исключают возможность газодинамического сообщения квартир непосредственно с лестничными клетками путем запрета эвакуации из квартир непосредственно на лестничную клетку в зданиях высотой более 3 этажей. Поскольку значительная часть существующего жилого фонда страны имеет такие архитектурные решения, при которых квартиры имеют выходы на лестничные клетки непосредственно, возникает необходимость научного анализа эффективности технических решений, позволяющих обеспечить необходимый уровень защиты обычных лестничных клеток при реконструкции зданий.

**Цель.** Разработать критерии и математические соотношения для оценки эффективности технических решений по защите лестничных клеток.

**Методы.** Используется аналитический и математический методы, позволяющие оценить совместное влияние динамики изменения опасных факторов пожара на лестничной клетке и в квартирах с нахождением спасаемого человека в зависимости от технических решений по защите лестничных клеток.

**Результаты.** Разработаны теоретические положения, позволяющие оценить влияние различных технических решений на ограничение распространения пожара из горящей квартиры на лестничную клетку и квартиры других этажей, с учетом проветривания лестничной клетки и огнестойкости конструкций применительно к задаче обеспечения эвакуации и спасения людей. Проведена апробация разработанных положений.

**Выводы.** На основе исследований разработаны критерии и математические соотношения для оценки эффективности различных технических решений по защите лестничных клеток, базирующиеся на прогнозах динамики распространения опасных факторов пожара из очага пожара на лестничную клетку и квартиры с учетом оконных проемов, огнестойкости конструкций в сравнении с временными интервалами эвакуации и спасения людей.

**Ключевые слова:** предел огнестойкости; строительные конструкции; эквивалентная продолжительность пожара; эвакуация людей при пожаре; спасение людей при пожаре; предельные значения опасных факторов пожара

**Для цитирования:** Пехотиков А.В., Ивашук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 59-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70

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

## Analysis of engineering solutions for the fire protection of conventional stairwells during the reconstruction of residential buildings of sectional type

Andrey V. Pekhotikov<sup>1</sup>, Roman A. Ivashchuk<sup>2</sup>, Alexander V. Gomozov<sup>1</sup>✉, Sergey A. Luchkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Zheldorproekt LLC, Moscow, Russian Federation

**ABSTRACT**

**Introduction.** Fire protection of stairwells plays a key role in ensuring human safety in residential buildings of sectional type, since a single stairwell blocked by fire makes it impossible to safely evacuate people from all apartments in a section and complicates the possibility of their rescue. Modern regulations exclude the possibility of gas-dynamic connection of apartments directly to stairwells by prohibiting evacuation from apartments directly to the stairwell in buildings higher than 3 floors. Since a considerable part of the existing housing stock in the country has such architectural solutions, in which apartments have access to stairwells directly, there is a need for a scientific analysis of the effectiveness of engineering solutions to ensure the necessary level of protection of usual stairwells during the reconstruction of buildings.

The purpose of this article is to develop criteria and mathematical relationships for evaluating the effectiveness of engineering solutions for the protection of stairwells.

**Methods.** Analytical and mathematical methods are used to assess the combined effect of the dynamics of changes in fire hazards in the stairwell and in apartments with the location of a rescued person, depending on the engineering solutions for the stairwell protection.

**Results.** Theoretical provisions have been developed to estimate the influence of different engineering solutions to limit the spread of fire from a burning apartment to a stairwell and apartments on the other floors, taking into account the ventilation of the stairwell and the fire resistance of structures in relation to the problem of ensuring evacuation and saving people. The developed provisions have been approved.

**Conclusions.** On the basis of the researches criteria and mathematical relations have been worked out to estimate the efficiency of different engineering solutions to protect stairwells, based on the forecasts of dynamics of spread of fire hazards from a fire origin to the stairwell and apartments, taking into account window openings, fire resistance of constructions in comparison with the time intervals of evacuation and rescuing people.

**Keywords:** fire resistance limit; building structures; equivalent fire duration; evacuation of people in case of fire; rescue of people in case of fire; limiting values of fire hazards

**For citation:** Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomozov A.V., Luchkin S.A. Analysis of engineering solutions for the fire protection of conventional stairwells during the reconstruction of residential buildings of sectional type. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):59-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70 (rus).

✉ Alexander Vasilievich Gomozov, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

**Введение**

Одной из особенностей пожаров в секционных жилых зданиях с обычными лестничными клетками является то, что в большинстве случаев опасные факторы пожара (ОФП) из квартиры быстро распространяются в объем лестничной клетки. Это обусловлено тем, что двери квартир не имеют устройств для самозакрывания, а эвакуирующиеся из горящих квартир жильцы в большинстве случаев не имеют возможности зафиксировать дверь в закрытом положении. При этом обнаружение пожара оставшимися жильцами происходит к моменту, когда значения опасных факторов пожара на лестничной клетке превышают предельно-допустимые значения и эвакуация представляет опасность для жизни. В этих случаях оставшиеся в своих квартирах жильцы вынуждены принять решение о необходимости дожидаться спасения силами пожарных подразделений. При этом происходит распространение ОФП из лестничных клеток в квартиру (через щели в дверном проеме), что в ряде случаев, как показывает практика пожаров, также приводит к гибели находящихся там людей.

Характерным примером такого сценария развития пожара является пожар в секционном жилом доме, который произошел в январе 2021 г. в Екатеринбурге, когда из-за невозможности эвакуации погибли 8 человек (2 человека погибли на лестнич-

ной клетке, а 6 — в квартирах), а спасение остальных осуществлялось пожарными подразделениями с использованием средств защиты органов дыхания — самоспасателей.

Необходимо отметить, что возможность газодинамического сообщения квартир непосредственно с лестничными клетками, которая обуславливает быстрое блокирование лестничной клетки ОФП при пожаре в квартире, обусловлена положениями действующих в период до 2020 г. нормативных документов, допускающих эвакуацию из квартир непосредственно на лестничную клетку. С учетом этого жилой фонд, построенный в СССР и РФ, содержит значительную долю таких квартир.

Положениями современных нормативных документов [1] возможность сообщения квартир непосредственно с лестничными клетками (нормативно оформленная как возможность эвакуации из квартир непосредственно на лестничную клетку) ограничена жилыми зданиями высотой до 3 этажей.

Однако для значительной части существующих жилых зданий реализовать данное современное нормативное решение при реконструкции невозможно, что обуславливает необходимость научного анализа и обоснования комплекса технических решений по противопожарной защите лестничных клеток, которые позволят обеспечить как возможность безопасной эвакуации людей, так и возможность их безопасного спасения путем ограничения возможно-

сти блокирования опасными факторами пожара лестничной клетки.

С учетом этого целью настоящей статьи является разработка научных положений, позволяющих оценить эффективность технических решений по обеспечению пожарной безопасности лестничных клеток реконструируемых секционных жилых зданий.

Для достижения указанной цели в рамках статьи предусмотрена разработка критериев и математических соотношений, позволяющих оценить влияние различных технических решений на безопасность людей при эвакуации и спасении по обычным лестничным клеткам реконструируемых жилых зданий в условиях пожара.

Кроме того, в статье предусмотрен анализ эффективности технических решений по обеспечению пожарной безопасности лестничных клеток, предусмотренных нормативными документами, а также дополнительных технических решений в случае реконструкции 5-этажного здания.

### Критерии и математические соотношения для оценки эффективности технических решений

Необходимый уровень противопожарной защиты обычной лестничной клетки в реконструируемых жилых зданиях считается обеспеченным при одновременном выполнении следующих двух критериев:

- совокупность технических решений по защите лестничных клеток должна обеспечивать возможность безопасной эвакуации всех мобильных людей из любой квартиры;
- совокупность технических решений по защите лестничных клеток должна обеспечивать возможность безопасного спасения людей из любой квартиры по данной лестничной клетке.

Возможность безопасной эвакуации по лестничной клетке считается обеспеченной при выполнении следующих основных условий:

- опасные факторы пожара на всем пути эвакуации людей по лестничной клетке до выхода наружу не превышают предельно допустимых значений;
- в течение всего времени эвакуации по лестничной клетке не происходит потеря огнестойкости (т.е. достижение предельных состояний по огнестойкости) тех ее конструкций, которые влияют на безопасность людей.

Данные условия описываются соотношением:

$$0,8t_{\text{бл}} \geq t_{\text{н.э}} + t_{\text{р}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{бл}}$  — время блокирования лестничной клетки ОФП, определяемое на основе математических моделей распространения пожара из квартиры

на лестничную клетку путем реализации необходимых программных продуктов [2–9] с учетом предельно-допустимых для людей значений ОФП [2, 10–12], а также времени достижения предельных состояний по огнестойкости тех конструкций здания, которые влияют на безопасность людей, при свободном развитии пожара  $t_{\text{огн}}$  (время потери огнестойкости):

$$t_{\text{бл.лк}} = \min\{t_{\text{кр}}^{\text{п.в}}, t_{\text{кр}}^{\text{T}}, t_{\text{кр}}^{\text{T.Г}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{T.П}}, t_{\text{огн}}\}, \quad (2)$$

$t_{\text{н.э}}, t_{\text{р}}$  — время начала эвакуации и расчетное время эвакуации соответственно, определяемые согласно [2].

Безопасность людей при спасении по лестничной клетке считается обеспеченной при выполнении следующих основных условий:

- опасные факторы пожара в квартире с людьми, ожидающими спасения пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента начала спасения, а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность людей в квартире;
- опасные факторы пожара на лестничной клетке, используемой для перемещения людей пожарными подразделениями, не превышают предельно допустимых значений до момента окончания их перемещения наружу (в том числе с учетом средств защиты, используемых этими людьми или переданных им пожарными), а также не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность перемещения людей наружу.

Данные условия описываются соотношениями:

$$0,8t_{\text{бл.кв}} \geq T_{\text{н.сп}}; \quad (3)$$

$$0,8t_{\text{бл.лк}}^{\text{сп}} \geq T_{\text{ок.сп}}; \quad (4)$$

где  $t_{\text{бл.кв}}$  — время блокирования квартиры, в которой расположен спасаемый человек;

$T_{\text{н.сп}}$  — время начала спасения, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента прибытия в квартиру к спасаемому человеку подразделений пожарной охраны;

$t_{\text{бл.лк}}^{\text{сп}}$  — время блокирования лестничной клетки, используемой при спасении;

$T_{\text{ок.сп}}$  — время окончания спасения человека из квартиры, осуществляемого подразделениями пожарной охраны по лестничной клетке, соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента перемещения спасаемого на безопасное расстояние от горящего здания.

Время блокирования квартир  $t_{\text{бл.кв}}$  при распространении ОФП из лестничной клетки через щели

закрытых дверей определяется на основе [13–17] при величине удельного сопротивления дымопроницаемости дверей  $S = 5500 \text{ м}^3/\text{кг}$  и с учетом времени достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара  $t_{\text{огн}}$  (время потери огнестойкости):

$$t_{\text{бл.кв}} = \min\{t_{\text{кр}}^{\text{п.в}}, t_{\text{кр}}^T, t_{\text{кр}}^{\text{т.г}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{т.п}}, t_{\text{огн}}\}. \quad (5)$$

Время начала спасения определяется по формуле:

$$T_{\text{н.сп}} = t_c + t_{\text{пр}} + t_{\text{пер}}, \quad (6)$$

где  $t_c$  — время от момента начала пожара до сообщения о нем в подразделение пожарной охраны;

$t_{\text{пр}}$  — время от момента сообщения о пожаре до момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию, определяемое в соответствии с положениями ч. 1 ст. 76 № 123-ФЗ;

$t_{\text{пер}}$  — время от момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию до момента окончания перемещения к спасаемому человеку.

При отсутствии в здании системы пожарной сигнализации (СПС) величина  $t_c$  принимается равной  $t_c = 4$  мин, при защите здания СПС принимается  $t_c = 1$  мин, а если СПС обеспечивает передачу сигнала о пожаре с дублированием сигнала на пульт подразделения пожарной охраны, то  $t_c = 0,5$  мин.

Время блокирования лестничной клетки, используемой при спасении  $t_{\text{бл.лк}}^{\text{сп}}$ , определяется по (2), при этом предельно-допустимые значения ОФП для спасаемого человека определяются с учетом имеющихся у него средств защиты (применение изолирующих самоспасателей позволяет не учитывать воздействие токсичных продуктов горения и снижение концентрации кислорода).

Время окончания спасения определяется по формуле:

$$T_{\text{ок.сп}} = T_{\text{н.сп}} + t_{\text{спл}} + t_{\text{пер}}^*, \quad (7)$$

где  $t_{\text{спл}}$  — время подготовки к спасению;

$t_{\text{пер}}^*$  — время перемещения спасаемого наружу, на безопасное расстояние от горящего здания.

Поскольку безопасность спасаемого человека может быть обеспечена только в случае безопасности пожарных подразделений, осуществляющих действия по его спасению, то должны выполняться следующие условия:

- опасные факторы пожара на лестничной клетке до момента  $T_{\text{ок.сп}}$  не должны превышать предельно-допустимых для пожарных значений, в том числе с учетом использования ими средств защиты от ОФП;
- не происходит потеря огнестойкости тех конструкций, которые влияют на безопасность пере-

мещения пожарных подразделений по лестничной клетке.

Данные положения описываются соотношением:

$$0,8t_{\text{бл.лк}}^{\text{пж}} \geq T_{\text{ок.сп}}; \quad (8)$$

$$t_{\text{бл.лк}}^{\text{пж}} = \min\{t_{\text{пж}}^{\text{п.в}}, t_{\text{пж}}^T, t_{\text{пж}}^{\text{т.г}}, t_{\text{пж}}^{\text{O}_2}, t_{\text{пж}}^{\text{т.п}}, t_{\text{огн}}\}. \quad (9)$$

В формулах (2), (5) и (9) время достижения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций при свободном развитии пожара  $t_{\text{огн}}$  (время от начала пожара до момента потери огнестойкости) определяется на основе расчета теплового воздействия пожара на строительные конструкции с учетом нагрузок, приложенных к этим конструкциям, или на основе данных об эквивалентной продолжительности пожара, изложенных в [18, 19]. При этом в обязательном порядке определяется время от начала пожара до момента потери огнестойкости несущих элементов здания, а также конструкций, отделяющих горящее помещение от лестничной клетки.

### Анализ эффективности нормативных решений

Анализ проведен для 5-этажного секционного жилого здания 1980 г. постройки, схема этажа которого показана на рис. 1. Здание имеет III степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности С0 и высоту, определенную согласно [1], не более 15 м. До реконструкции защита здания СПС и системой оповещения и управления эвакуацией при пожаре (СОУЭ) не предусмотрена согласно положениям нормативных документов, действующих в период его постройки. Очаг пожара нахо-

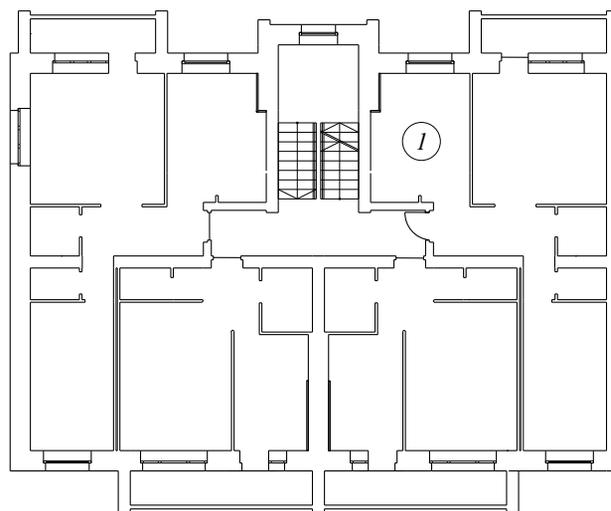


Рис. 1. Схема расположения помещений на этаже, на котором возник пожар: I — очаг пожара

Fig. 1. The layout of the premises on the floor on which the fire broke out: I — the source of the fire

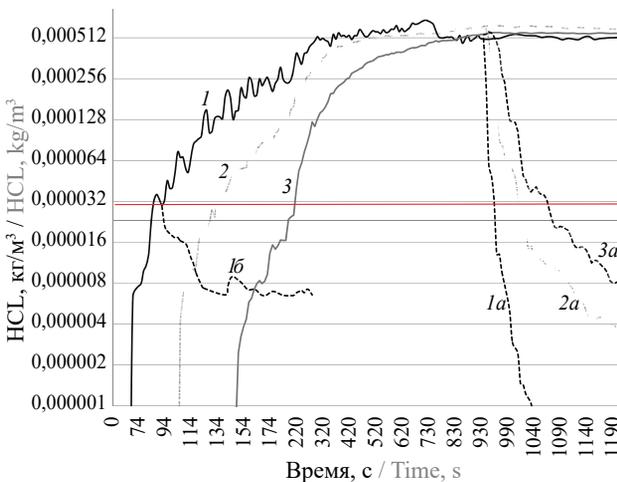
дится на 1-м этаже в квартире с проемностью  $\Pi = 0,12 \text{ м}^{0.5}$ . Двери из квартиры на лестничную клетку не огнестойкие, без устройств для самозакрывания, но имеют металлический каркас и металлическую наружную поверхность. Принимается, что один из жильцов на 5-м этаже является немобильным (НМ), а остальные жильцы могут самостоятельно эвакуироваться по лестничной клетке.

При реконструкции здания необходимо реализовать положения действующих нормативных документов о необходимости его защиты СПС и СОУЭ согласно [20], а также устройство в наружных стенах лестничных клеток окон с открывающимися створками шириной не менее 0,6 м [1].

При пожаре жильцы в горящей квартире могут обнаружить пожар визуально или по сигналам автономных пожарных извещателей и эвакуироваться на лестничную клетку и далее наружу.

Квартирная дверь не имеет устройств для самозакрывания и не является противопожарной, поэтому данная дверь принимается открытой, с учетом чего продукты горения будут распространяться из квартиры на лестничную клетку. Динамика изменения опасных факторов пожара на лестничной клетке будет соответствовать расчетным величинам, представленным на рис. 2–4 (приведены только результаты расчетов динамики изменения концентрации НСЛ, которые достигают предельно-допустимых значений раньше остальных).

Из рис. 2 видно, что концентрация НСЛ на лестничной клетке превысит предельно-допу-



**Рис. 2.** Динамика изменения концентрации НСЛ на различных этажах лестничной клетки: 1–3 — на площадках 1–3-го этажей при закрытых окнах; 1а–3а — на площадках 1–3-го этажей после открытия окон; 1б — на площадке 1-го этажа при оборудовании двери доводчиком

**Fig. 2.** Dynamics of changes in the concentration of HCL on different floors stairwell: 1–3 — on platforms of 1–3 floors with closed windows; 1a–3a — on the grounds of 1–3 floors after opening the windows; 1b — on the site of the 1st floor when the door is equipped with a door closer

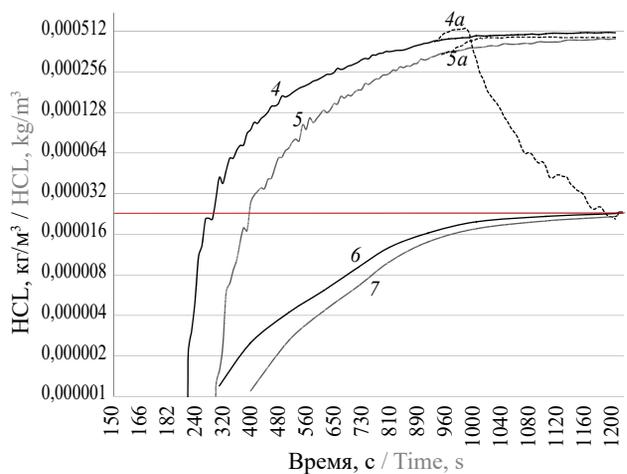
стимое значение на 1-м этаже через 82 с (1,4 мин) от начала пожара, а на 2-м этаже — через 127 с (2,1 мин) от начала пожара.

Для определения возможности безопасной эвакуации по лестничной клетке согласно (1) необходимо оценить время достижения предельных состояний по огнестойкости несущих элементов здания (межэтажное перекрытие) и внутренних стен лестничной клетки при пожаре. Данные конструкции имеют предел огнестойкости REI 45. Используя представленные в [19] графические зависимости между эквивалентной продолжительностью пожара и реальной (характерной) продолжительностью пожара для железобетонных конструкций перекрытий и несущей внутренней стены лестничной клетки, получим, что при проемности  $\Pi = 0,12 \text{ м}^{0.5}$  продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости перекрытия, будет равна 39 мин, а продолжительность пожара, которая сопровождается потерей огнестойкости внутренней стены лестничной клетки, равна 31 мин. Исходя из этого получим  $t_{огн} = 31 \text{ мин}$ .

С учетом этого время блокирования лестничной клетки, определенное согласно (2), будет равно:

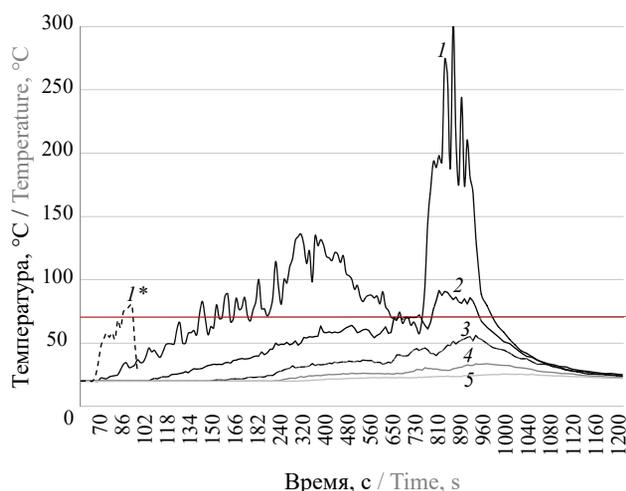
$$t_{\text{блок}} = \min\{t_{\text{кр}}^{\text{п.в}}, t_{\text{кр}}^T, t_{\text{кр}}^{\text{т.г}}, t_{\text{кр}}^{O_2}, t_{\text{кр}}^{\text{т.п}}, t_{\text{огн}}\} = 1,4 \text{ мин.}$$

Реконструкция здания предусматривает его защиту СПС и СОУЭ. При наиболее эффективных системах СОУЭ IV или V типа время начала эвакуации будет составлять  $t_{\text{н.э}} = 4 \text{ мин}$ . Принимая расчетное время эвакуации из квартир 5-го этажа  $t_p = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$ ,



**Рис. 3.** Динамика изменения концентрации НСЛ на различных этажах лестничной клетки: 4, 5 — на площадках 4 и 5-го этажей при закрытых окнах; 4а, 5а — на площадках 4 и 5-го этажей после открытия окон; 6, 7 — в квартирах 4 и 5-го этажей

**Fig. 3.** Dynamics of changes in the concentration of HCL on different floors staircase: 4, 5 — on the grounds of the 4th and 5th floors with the windows closed; 4a, 5a — on the grounds of the 4th and 5th floors after opening the windows; 6, 7 — in apartments of 4 and 5 floors



**Рис. 4.** Динамика изменения температуры на различных этажах лестничной клетки: 1–5 — на площадках 1–5-го этажей; 1\* — на площадке 1-го этажа при оборудовании двери доводчиком  
**Fig. 4.** Dynamics of temperature changes on different floors stairwell: 1–5 — on floors 1–5; 1\* — on the site of the 1st floor when the door is equipped with a door closer

получим  $t_p + t_{н.э} = 1 + 4 = 5$  мин. При этом условие (1), т.е.  $0,8t_{\text{бл.лк}} \geq t_p + t_{н.э}$ , не выполняется.

Таким образом, реализация современного нормативного решения по оснащению здания СПС и СОУЭ не обеспечит возможность безопасной эвакуации из квартир по лестничной клетке, т.е. для людей, которые приняли решение об эвакуации по лестничной клетке, воздействие ОФП может сопровождаться смертельным исходом, что и подтверждается практикой пожаров.

С учетом этого необходимо оценить возможность безопасного спасения жильцов, которые после обнаружения дыма на лестничной клетке были вынуждены принять решение не эвакуироваться, а дожидаться спасения в квартире.

Оценим возможность пожарных подразделений достигнуть спасаемого человека и обеспечить его защиту от воздействия ОФП путем передачи ему изолирующего самоспасателя, огнестойкой накидки (при необходимости) и др. до момента блокирования квартиры ОФП, т.е. до момента  $t_{\text{бл.кв}}$ .

При защите здания СПС значение времени сообщения о пожаре будет составлять  $t_c = 1$  мин. При времени прибытия  $t_{\text{пр}} = 10$  мин пожарные достигнут лестничной клетки через 12 мин от начала пожара, что будет сопровождаться открытием ее наружной двери для прокладки пожарных рукавов и т.д. При этом поступление наружного воздуха на лестничную клетку, как видно из рис. 4, приведет к повышению температуры в зоне площадки 1-го этажа до 300 °С, что вызвано догоранием продуктов пиролиза, распространившихся из горячей квартиры на лестничную клетку.

Данные обстоятельства могут вызвать необходимость охлаждения газов на лестничной клетке путем подачи распыленных струй воды, подачи воды на тушение очага пожара в квартире и др., что вызовет задержку в перемещении пожарных на верхние этажи к спасаемым жильцам.

Вместе с тем понимание пожарными необходимости скорейшего прибытия к спасаемым жильцам, а также наличие у пожарных защитной одежды и средств защиты органов дыхания и зрения позволяет предположить, что время от момента прибытия подразделения пожарной охраны к зданию до момента окончания перемещения к спасаемому человеку на 4-й или 5-й этаж может быть принято  $t_{\text{пер}} = 4$  мин.

Тогда время начала спасения, определенное согласно (6), будет равно  $T_{\text{н.сп}} = 1 + 10 + 4 = 15$  мин.

Поскольку температура на лестничной клетке на 1 и 2-м этажах превышает допустимые для спасаемых жильцов значения, для обеспечения безопасного перемещения спасаемых жильцов наружу необходимы огнестойкие накидки.

Кроме того, как видно из рис. 2, 3, в этот период на всех этажах лестничной клетки имеет место существенное превышение концентрации НСЛ допустимых значений, что не позволяет обеспечить безопасное перемещение спасаемых наружу без использования изолирующих самоспасателей для всех жильцов.

Поскольку количество изолирующих самоспасателей и огнестойких накидок у пожарных подразделений ограничено, а также ограничено число пожарных, которые могут осуществлять спасение жильцов, при необходимости выполнения других обязательных действий: тушения горячей квартиры и др., то предполагается, что пожарными на 15-й мин пожара (через 4 мин после прибытия) принимается решение о необходимости закрытия двери горячей квартиры, а после этого — открытия створок окон в наружной стене лестничной клетки на 3, 4 и 5-м этажах (на 15,5 мин пожара).

После этого происходит снижение температуры на лестничной клетке до значения менее 70 °С (рис. 4), а концентрация НСЛ на 1–3 этажах достаточно быстро опускается до безопасных значений (рис. 2). Это позволяет по команде руководителя тушения пожара жильцам 1–3 этажей самостоятельно перемещаться в сопровождении пожарных по лестничной клетке наружу после 1070 с (17,8 мин) от момента начала пожара.

Однако, как видно из рис. 3, концентрация НСЛ на 4-м этаже снижается достаточно долго, так как размер открываемой створки окна не обеспечивает достаточно интенсивное удаление ОФП наружу. Поскольку верхнее окно лестничной

клетки расположено ниже площадки 5-го этажа (на уровне промежуточной площадки), то открытие окон не приводит к снижению концентрации HCL на уровне 5-го этажа, при этом концентрация даже незначительно повышается из-за того, что часть продуктов горения с более высокой концентрацией HCL поднялась вверх (рис. 3).

С учетом этого, как показывают расчеты, из-за ограниченного периода времени распространения продуктов горения опасной концентрации из лестничной клетки в квартиры 1–3-го этажей концентрация HCL в этих квартирах (в наиболее удаленных помещениях — спальнях) не достигает предельно-допустимых значений.

А распространение продуктов горения из лестничной клетки в квартиры 4 и 5-го этажей, как видно из рис. 3, приведет к тому, что в расположенной на 4-м этаже квартире время достижения предельно-допустимого значения концентрации HCL составит 1212 с (20,2 мин), а на 5-м этаже — 1330 с (22,2 мин).

С учетом этого время блокирования квартир 4-го этажа, определенное согласно (5) с учетом  $t_{огн} = 33$  мин, будет равно:

$$t_{бл.кв} = \min\{t_{кр}^{п.в}, t_{кр}^T, t_{кр}^{т.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{т.п}, t_{огн}\} = 20,2 \text{ мин,}$$

а время блокирования квартир 5-го этажа будет соответственно равно 22,2 мин.

При этом неравенство (3), т.е. условие  $0,8t_{бл.кв} \geq T_{н.сп}$ , выполняется для 4 и 5-го этажей, поскольку  $T_{н.сп} = 15$  мин, а  $0,8t_{бл.кв} = 0,8 \cdot 20,2 = 16,2$  мин.

Это подтверждает, что пожарные могут достигнуть спасаемых жильцов 4 и 5-го этажей до момента блокирования их квартир ОФП, передать им изолирующие самоспасатели и начать готовить к перемещению наружу по команде руководителя тушения пожара (пожарные обеспечивают сопровождение перемещения наружу мобильных жильцов и перемещение недвижимого жилья на носилках). При этом из-за блокирования 4 и 5-го этажей лестничной клетки HCL самоспасатели потребуются для всех жильцов 4 и 5-го этажей.

Очевидно, что перемещение недвижимого человека на носилках наружу будет более продолжительным и опасным, чем перемещение наружу мобильных жильцов 1–5 этажей, с учетом чего анализ возможности безопасного спасения недвижимого человека должен быть проведен в первую очередь.

Для оценки выполнения условий безопасного перемещения спасаемого недвижимого человека наружу (4) на основе данных [21] принимаем период подготовки человека к спасению (надевание самоспасателя, перекалывание на носилки, подтверждение того, что дверь горящего помещения закрыта и др.)  $t_{сп1} = 2$  мин, а время перемещения спасаемого

наружу, на безопасное расстояние от горящего здания  $t_{пер}^* = 3,5$  мин. Тогда время окончания спасения будет равно:

$$T_{ок.сп} = T_{н.сп} + t_{сп1} + t_{пер}^* = 15 + 2 + 3,5 = 20,5 \text{ мин.}$$

При закрытой двери горящего помещения температура на лестничной клетке не представляет опасности для спасаемого человека и пожарных.

Факт защиты спасаемого изолирующим самоспасателем позволяет не учитывать повышенные концентрации токсичных продуктов горения на 4 и 5-м этажах, а также снижение концентрации кислорода.

Аналогичным образом повышенные концентрации токсичных продуктов горения можно не учитывать для пожарных подразделений в средствах защиты, обеспечивающих перемещение спасаемого наружу.

С учетом этого время блокирования лестничной клетки  $t_{бл.лк}^{сп}$  при перемещении спасаемого человека, определенное согласно (2), будет равно:

$$t_{бл.лк}^{сп} = \min\{t_{пож}^{п.в}, t_{пож}^T, t_{пож}^{т.г}, t_{пож}^{O_2}, t_{пож}^{т.п}, t_{огн}\} = t_{огн} = 31 \text{ мин.}$$

Поскольку  $0,8t_{бл.лк}^{сп} = 0,8 \cdot 31 = 24,8$  мин, то соотношение (4), т.е. условие  $0,8t_{бл.лк}^{сп} \geq T_{ок.сп}$ , для недвижимого жилья выполняется. Поскольку время окончания спасения мобильных жильцов значительно меньше, чем  $T_{ок.сп} = 20,5$  мин для недвижимого жилья, то возможность безопасного спасения всех находящихся в здании жильцов можно считать обеспеченной.

Аналогичным образом, с учетом защитной одежды пожарных можно не учитывать воздействие на них ОФП. Из этого, согласно расчетам по (9), следует, что  $t_{бл.лк}^{пож} = 31$  мин и неравенство (8), т.е.  $0,8t_{бл.лк}^{пож} \geq T_{ок.сп}$ , выполняется.

Таким образом, проведенный анализ эффективности нормативных решений по защите лестничной клетки от ОФП показал, что данные решения не обеспечивают возможность безопасной эвакуации, а для обеспечения возможности безопасного спасения людей необходимо не только привлечение большого числа пожарных, но и наличие у них значительного количества самоспасателей, что достаточно сложно обеспечить на практике. Полное закрытие двери горячей квартиры также не всегда возможно при пожаре из-за необходимости прокладки рукавных линий и т.д. Кроме того, действия пожарных по открытию окон лестничной клетки должны совершаться только после того, как будет установлено отсутствие людей без средств защиты на лестничной клетке (с учетом возможной вспышки несгоревших продуктов пиролиза) и при закрытой двери горячей квартиры, что предполагает достаточную

квалификацию пожарных подразделений и возможность обеспечения синхронизации их действий руководителем тушения пожара.

С учетом этого необходимо проанализировать эффективность дополнительных решений, позволяющих обеспечить необходимый уровень противопожарной защиты лестничной клетки.

### Анализ эффективности дополнительных решений

В рамках оценки эффективности дополнительных решений для защиты лестничной клетки проанализированы целесообразность использования для ограничения распространения пожара из квартир на лестничную клетку металлических квартирных дверей с устройствами для самозакрывания (или противопожарных дверей) с защитой проема водяными оросителями, расположенными над проемом со стороны лестничной клетки.

Необходимо отметить, что применение устройств для самозакрывания в конструкции входных дверей квартиры, как и применение противопожарных дверей в настоящее время, не имеет достаточной практической апробации (применение противопожарных квартирных дверей предусмотрено в отдельных специальных технических условиях для ограниченного круга зданий). Поэтому положениями п. 4.4.6 нормативного документа [1] не предусмотрена необходимость оборудования дверей выхода из квартир на лестничную клетку устройствами для самозакрывания.

Несомненно, что в случае их применения устройства для самозакрывания квартирных дверей должны соответствовать [22], монтироваться открыто со стороны внеквартирного коридора как накладной доводчик верхнего расположения, что позволяет контролировать его наличие и техническое состояние управляющей компанией.

Вместе с тем, поскольку устройства для самозакрывания создают отдельные неудобства для жильцов (затрудняют открытие дверей детьми и т.д.), то возможно приведение жильцами данных устройств в неработоспособное состояние или регулировка, при которой закрытие дверей будет неплотным.

Кроме того, практика тушения пожаров показывает, что в отдельных случаях люди, эвакуирующиеся из квартир, при воздействии ОФП теряли сознание и падали в проемах выходов на лестничную клетку, тем самым препятствуя закрытию этой двери.

С учетом этого предлагаемое устройство квартирных дверей с устройствами для самозакрывания (или противопожарных дверей) в сочетании с защитой проема водяными оросителями, распо-

ложенными над проемом со стороны лестничной клетки, позволяет ограничить распространение пожара из квартир на лестничную клетку через щели, обусловленные неплотным закрытием двери, а также щели, обусловленные прокладкой пожарных рукавов из лестничных клеток в квартиру.

В качестве водяных оросителей могут быть использованы спринклер с температурой срабатывания 60 °С или дренчер, пуск которого предусмотрен от автоматического теплового пожарного извещателя с аналогичной температурой срабатывания, установленного над дверным проемом.

При анализе эффективности данных дополнительных технических решений будем исходить из того, что при пожаре жильцы в горящей квартире могут обнаружить пожар визуально или по сигналам автономных пожарных извещателей и эвакуироваться на лестничную клетку за время не более  $t_3 \leq 90$  с (1,5 мин).

Принимая при расчетах, что в период до момента  $t_3$  дверь квартиры будет открыта, а после  $t_3$  — закроется посредством устройства для самозакрывания, получим, что концентрация НСЛ на площадке 1-го этажа лестничной клетки превысит допустимое значение в период, когда дверь открыта, а затем, после закрытия двери, т.е. после 90 с, достаточно быстро опустится до величины, не представляющей опасности для эвакуирующихся (см. кривую 1б на рис. 2).

Аналогичным образом, как видно из графика 5 на рис. 4, температура над дверным проемом горящей квартиры на площадке 1-го этажа лестничной клетки превысит допустимое значение в период, когда дверь открыта, а затем, после закрытия двери, достаточно быстро опустится до величины, не представляющей опасности для эвакуирующихся (см. кривую 1\* на рис. 4). Из этого графика видно, что температура продуктов горения, выходящих из квартиры, достигает значения 60 °С, соответствующего температуре срабатывания спринклера или теплового пожарного извещателя, раньше предполагаемого времени закрытия двери. С учетом этого срабатывание оросителей даст эффект, аналогичный закрытию двери.

Поскольку время начала эвакуации при наличии СПС и СОУЭ 4-го типа будет составлять  $t_{н.э} = 4$  мин, то временное превышение концентрации НСЛ и температуры до момента начала эвакуации не представляет опасности для людей и корректно считать, что лестничная клетка не блокируется ОФП.

С учетом этого время блокирования лестничной клетки равно:

$$t_{\text{бл.лк}} = \min\{t_{\text{кр}}^{\text{ПБ}}, t_{\text{кр}}^{\text{T}}, t_{\text{кр}}^{\text{T.Г}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{T.П}}, t_{\text{отн}}\} = 31 \text{ мин.}$$

При этом условие (1), т.е.  $0,8t_{\text{бл}} \geq t_p + t_{\text{н.э}}$ , выполняется и возможность безопасной эвакуации обеспечивается для всех мобильных жильцов. Поэтому спасение потребуется только для немобильного жильца, находящегося на 5-м этаже.

Поскольку опасные факторы пожара до момента потери огнестойкости стен лестничной клетки не распространяются из горящей квартиры на лестничную клетку, а следовательно, и в квартиру, где находится спасаемый человек, то расчеты по (5), (6) и (9) дадут следующие результаты:

$$t_{\text{бл.кв}} = t_{\text{огн}} = 31 \text{ мин};$$

$$t_{\text{бл.лк}}^{\text{сп}} = t_{\text{огн}} = 31 \text{ мин};$$

$$t_{\text{бл.лк}}^{\text{пож}} = t_{\text{огн}} = 31 \text{ мин}.$$

Учитывая ранее полученные значения  $T_{\text{н.сп}} = 15$  мин и  $T_{\text{ок.сп}} = 20,5$  мин, получим, что неравенство (3), т.е. условие  $0,8t_{\text{бл.кв}} \geq T_{\text{н.сп}}$ , выполняется, поскольку  $0,8t_{\text{бл.кв}} = 0,8 \cdot 31 = 24,8$  мин.

Кроме того, как показано выше, соотношение (4) и (8), т.е. условия  $0,8t_{\text{бл.лк}}^{\text{сп}} \geq T_{\text{ок.сп}}$  и  $0,8t_{\text{бл.лк}}^{\text{пож}} \geq T_{\text{ок.сп}}$ , также выполняются.

Таким образом, предложенные дополнительные технические решения по защите лестничной клетки отвечают одновременно двум сформулированным в статье критериям и обеспечивают возможность как безопасной эвакуации всех людей из любой квартиры, так и возможность их безопасного их спасения.

## Выводы

При реконструкции секционных жилых зданий высотой более 3 этажей невозможно реализовать современные требования по обеспечению пожарной безопасности обычных лестничных клеток, исключая возможность газодинамического сообщения квартир непосредственно с лестничными клетками. Данное обстоятельство вызывает необходимость разработки научных положений, позволяющих провести анализ технических решений, направленных на обеспечение необходимой защиты лестничных клеток от пожара.

Разработанные и представленные в статье общие критерии и математические соотношения позволяют оценить эффективность различных технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции жилых зданий, т.е. влияние тех или иных мероприятий на безопасность людей в случае их эвакуации и спасения по данным лестничным клеткам в условиях пожара в сочетании с анализом временных

интервалов развития опасных факторов пожара, эвакуации людей, перемещения пожарных подразделений к спасаемому человеку и его спасения путем сопровождения или перемещения на носилках наружу.

Сформулированные критерии и математические соотношения описывают условия, при которых будет обеспечена безопасность людей при эвакуации, безопасность спасаемых людей и безопасность пожарных подразделений с учетом пределов огнестойкости конструкций, которые отделяют пути эвакуации людей от горящих помещений. Для апробации разработанных критериев и математических соотношений проведен анализ эффективности нормативных и дополнительных решений по противопожарной защите обычной лестничной клетки в реконструируемом жилом 5-этажном здании.

Данный анализ показал, что реализация только нормативных решений не обеспечивает возможность безопасной эвакуации. А для обеспечения возможности безопасного спасения людей требуется привлечение большого числа пожарных, а также использование значительного количества самоспасателей. Кроме того, возникает ряд проблем, связанных с тем, что при прокладке рукавных линий в квартиру невозможно исключить газодинамическое сообщение очага пожара и лестничной клетки, которое будет сопровождаться догоранием в ней продуктов пиролиза и возникновением локальных вспышек. С учетом этого действия пожарных по открытию окон лестничной клетки должны быть синхронизированы с действиями по закрытию двери горящей квартиры и выполняться в сроки, исключая блокирование квартир ОФП.

Дополнительные технические решения для защиты лестничной клетки, предполагающие использование металлических квартирных дверей с устройствами для самозакрывания (или противопожарных дверей) с защитой проема водяными оросителями, расположенными над проемом со стороны лестничной клетки, позволяют ограничить распространение пожара из квартир на лестничную клетку через щели, обусловленные неплотным закрытием двери, а также щели, обусловленные прокладкой пожарных рукавов из лестничных клеток в квартиру.

Данные дополнительные технические решения по защите лестничной клетки отвечают одновременно двум сформулированным в статье критериям и обеспечивают возможность как безопасной эвакуации всех людей из любой квартиры, так и возможность их безопасного их спасения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx>
- Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : 2-е изд., испр. и доп. М. : ВНИИПО, 2016. 79 с.
- Пехотиков А.В., Ивацук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А.* Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 84–95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95
- McGrattan K., Miles S.* Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers. 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
- Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-compartment fire scenarios : Final Report of the PRISME Project // Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2017), 14 January 2018. URL: [www.oecd-nea.org](http://www.oecd-nea.org)
- Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56.
- Дроздов Д.С., Дроздова Т.И.* Графическое моделирование для оценки опасных факторов пожара // Техногенная и природная безопасность : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. г. Саратов, 24–26 апреля 2019 г. / под ред. С.М. Рогачевой, А.С. Жутова, И.М. Учайевой. Саратов : Амирит, 2019. С. 69–73.
- Бедрина Е.А., Рекин А.С., Хранский С.Ф., Бокарев А.И., Денисова Е.С.* Прогнозирование динамики тепломассообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
- McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.* Fire dynamics simulator : user's guide // National Institute of Standards and Technology. 2019. 288 p. URL: [https://www2.thunderheadeng.com/files/net/nistdocs/FDS\\_User\\_Guide.pdf](https://www2.thunderheadeng.com/files/net/nistdocs/FDS_User_Guide.pdf)
- Leventon I., Bonny J.* Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk // Interflam 2019. London, 1. 2020. DOI: 10.1002/fam.2857
- Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L.* Modelling and influencing human behaviour in fire // Fire and Materials. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 412–430. URL: <https://www.nist.gov/publications/modelling-and-influencing-human-behaviour-fire> DOI: 10.1002/fam.2391
- ISO 13571:2012. Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
- Матюшин А.В., Гомозов А.В., Ивацук Р.А.* Моделирование динамики опасных факторов пожара в помещениях с людьми, нуждающимися в спасении, с учетом наличия неплотностей в притворах дверей // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 63–68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20929304>
- Матюшин А.В., Гомозов А.В., Ивацук Р.А.* Методика расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях при наличии неплотностей в притворах дверей (щелей) // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 92–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25064046>
- Saariinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H.* Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — Validation by using tracer gases and simulated smoke videos // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. Issue 7. P. e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
- McLaughlin D.M.B.* Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke development : Final Report // Fire Protection Research Foundation. San Francisco, CA, USA, 2018. URL: [nfpa.org/foundation](http://nfpa.org/foundation)
- Zhang C., Asif U.* Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 78. Pp. 85–95. URL: <https://www.nist.gov/publications/heat-transfer-principles-thermal-calculation-structures-fire> DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.08.006
- Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гордиенко Д.М.* Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 31–39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23092671>
- Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения : рекомендации. М. : ВНИИПО, 1988. 56 с.
- СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. URL: [www.standards.ru](http://www.standards.ru)
- Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Белоухов И.Р.* Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пос. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.
- ГОСТ Р 56177–2014. Устройства закрывания дверей (доводчики). Технические условия.

## REFERENCES

1. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits. URL: <https://www.standards.ru/document/6528504.aspx> (rus).
2. *Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard : 2nd ed., rev. and add.* Moscow, VNIPO, 2016; 79. (rus).
3. Pekhotikov A.V., Ivashchuk R.A., Gomofov A.V., Luchkin S.A. Analyzing the influence of the fire resistance of building structures on human safety in case of a fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):84-95. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.84-95 (rus).
4. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers*. 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
5. Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-compartment fire scenarios : Final report of the PRISME project. *Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2017), January 14, 2018*. URL: [www.oecd-nea.org](http://www.oecd-nea.org)
6. Yarosh A.S., Chalatahshvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachko A.V. Analysis of mathematical models for the development of dangerous fire factors in the system of buildings and structures. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry*. 2019; 1:50-56. (rus).
7. Drozdov D.S., Drozdova T.I. Graphic modeling for assessing fire hazards. *Tekhnogennaya i prirodnyaya bezopasnost : sb. scientific tr. V international scientific and practical. conf. Saratov, April 24–26, 2019*. C.M. Rogacheva, A.S. Zhutova, I.M. Uchaeva (ed.). Saratov, Amirit Publ., 2019; 69-73. (rus).
8. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Heat-mass exchange processes dynamics forecasting in fires in typical multistorey apartment buildings. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15 (rus).
9. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire dynamics simulator : user's guide. *National Institute of Standards and Technology*. 2019; 288. URL: [https://www2.thunderhead-eng.com/files/net/nistdocs/FDS\\_User\\_Guide.pdf](https://www2.thunderhead-eng.com/files/net/nistdocs/FDS_User_Guide.pdf)
10. Leventon I., Bonny J. Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire risk. *Interflam 2019*. London, 1; 2020. DOI: 10.1002/fam.2857
11. Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and influencing human behaviour in fire. *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 412–430. URL: <https://www.nist.gov/publications/modelling-and-influencing-human-behaviour-fire>. DOI: 10.1002/fam.2391
12. ISO 13571:2012. Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
13. Matyushin A.V., Gomofov A.V., Ivashchuk R.A. Simulation of dynamics of dangerous fire factors in premises with people in need of rescue, taking into account the frame ledge of doors. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2013; 4:63-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20929304> (rus).
14. Matyushin A.V., Gomofov A.V., Ivashchuk R.A. Design procedure of dynamics of dangerous factors of fire in rooms in the presence of loose-fitting doors (narrow slots). *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 4:92100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25064046> (rus).
15. Saarinen P.E., Kalliomäki P., Tang J.W., Koskela H. Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway — validation by using tracer gases and simulated smoke videos. *PLoS ONE*. 2015; 10(7):e0130667. DOI: 10.1371/journal.pone.0130667
16. McLaughlin D.M.B. Influence of gap sizes around swinging doors with builders hardware on fire and smoke development : Final report. *Fire Protection Research Foundation*. San Francisco, CA, USA, 2018. URL: [nfpa.org/foundation](http://nfpa.org/foundation)
17. Zhang C., Asif U. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire. *Fire Safety Journal*. 2015; 78:85-95. URL: <https://www.nist.gov/publications/heat-transfer-principles-thermal-calculation-structures-fire>
18. Shebenko Yu.N., Shebeko A.Yu., Gordienko D.M. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:31-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23092671> (rus).
19. *Methods for calculating the temperature regime of a fire in the premises of buildings for various purposes : Recommendations*. Moscow, VNIPO Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1988; 56. (rus).
20. SP 486.1311500.2020. Fire protection systems. List of buildings, structures, premises and equipment to be protected by automatic fire extinguishing installations and fire alarm systems. URL: [www.standards.ru](http://www.standards.ru) (rus).
21. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., Kudrin I.S., Istratov R.N., Belosokhov I.R. *Evacuation and behavior of people in case of fires : textbook*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2015; 262. (rus).
22. GOST R 56177–2014. Door closing devices (door closers). Specifications. (rus).

Поступила 24.01.2023, после доработки 20.02.2023;  
принята к публикации 06.03.2023

Received January 24, 2023; Received in revised form February 20, 2023;

Accepted March 6, 2023

**Информация об авторах**

**ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович**, канд. техн. наук, начальник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760878; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

**ИВАЩУК Роман Анатольевич**, главный специалист по пожарной безопасности, ООО «Желдорпроект», Россия, 107023, г. Москва, Семеновская пл., 1А; РИНЦ ID: 544455; ORCID: 0000-0003-2250-2418; e-mail: newtrad@yandex.ru

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

**ЛУЧКИН Сергей Алексеевич**, младший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760855; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the author**

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

**Roman A. IVASHCHUK**, Chief Fire Safety Specialist, “Zheldorproekt” LLC, Semenovskaya Square, 1A, Moscow, 107023, Russian Federation; ID RISC: 544455; ORCID: 0000-0003-2250-2418; e-mail: newtrad@yandex.ru

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

**Sergey A. LUCHKIN**, Junior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760855; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

*The authors declare no conflicts of interests.*

## Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны

Станислав Александрович Ермаков<sup>1</sup>✉, Артем Андреевич Дмитриев<sup>1</sup>,  
Полина Федоровна Постаногова<sup>1</sup>, Дмитрий Олегович Толстик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Целью данного исследования является определение минимальных затрат на путь до очагов низового лесного пожара и на его локализацию. Для достижения поставленной цели выполняются задачи: по анализу выбранного метода для расчета минимальных затрат на процесс выгрузки пожарного десанта и процесс локализации низового лесного пожара соответственно; по идентификации и характеристике необходимого оборудования, используемого при локализации низового лесного пожара; по определению оптимального пути и количества сотрудников МЧС в составе пожарного десанта с помощью приведенного псевдокода.

**Аналитическая часть.** Произведен обзор моделей, методов и алгоритмов поиска кратчайшего пути, оптимизации, кольцевой маршрутизации транспорта. Поставлена некоторая задача тушения лесного пожара. Применение модифицированного метода Кларка – Райта, который учитывает возможность варьирования глубины сращивания маршрутов и определение оптимального значения вероятности осуществления ухудшающего шага, позволяет найти минимальные временные затраты авиалесоохраны на локализацию низового лесного пожара. Предоставлено решение задачи доставки пожарного десанта благодаря псевдокоду, реализующему базовый метод Кларка – Райта.

**Выводы.** Решение на основе модифицированного метода Кларка – Райта предложит кольцевые авиамаршруты, которые будут закреплены за вертолетом, благодаря чему доставка пожарного десанта станет экономически обоснованной. Результаты исследования будут полезны аналитикам и разработчикам программного обеспечения для осуществления деятельности авиалесоохраны.

**Ключевые слова:** низовой лесной пожар; авиалесоохрана; локализация пожара; пожарный десант; кольцевая маршрутизация транспорта

**Для цитирования:** Ермаков С.А., Дмитриев А.А., Постаногова П.Ф., Толстик Д.О. Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 71–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.71-78

✉ Ермаков Станислав Александрович, e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

## Application of Clarke and Wright algorithm in the tasks of forest fire suppression by aviation forest air protection

Stanislav A. Ermakov<sup>1</sup>✉, Artem A. Dmitriev<sup>1</sup>, Polina F. Postanogova<sup>1</sup>, Dmitriy O. Tolstikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of this study is to determine the minimum cost of a path to a standstill forest fire and its localization. To achieve this goal, it is necessary to perform the tasks of analyzing the selected method for calculating the minimum costs for the process of unloading a fire landing and the process of localization of a low forest fire accordingly; identifying and characterizing the necessary equipment used in localizing a low forest fire; on definition of the optimal way and the number of employees of the Ministry of Emergency Situations as part of a fire landing force using an algorithm in the form of a pseudocode.

**The analytical part.** The models, methods and algorithms of search of shortest way, optimization, circulation routing of transport are reviewed. Some problem of extinguishing of forest fire is set. The application of the modified Clarke and Wright algorithm, which considers a possibility of variation of depth of route splice and definition of optimal value of probability of realization of the worsening step, makes it possible to find the minimum time

spent by aviation forest protection for localization of a low forest fire. A solution to the problem of fire troop delivery thanks to pseudocode implementing the basic Clarke and Wright algorithm is given.

**Conclusions.** The solution based on the modified Clarke and Wright algorithm provides circular air routes that will be assigned to a helicopter, so that the delivery of firefighting troops will become economically feasible. The results of the research will be useful to analysts and software developers for the implementation of aerial firefighting activities.

**Keywords:** lowland forest fire; aerial forest protection; firefighting; fire landing; transport routing

**For citation:** Ermakov S.A., Dmitriev A.A., Postanogova P.F., Tolstikov D.O. Application of Clarke and Wright algorithm in the tasks of forest fire suppression by aviation forest air protection. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):71-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.71-78 (rus).

✉ Stanislav Aleksandrovich Ermakov, e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

## Введение

Среди множества задач в экстремальных условиях, к которым относят локализацию лесного низового пожара, одной из основных является нахождение кратчайшего пути авиалесоохраны. В литературе [1–4] анализируются некоторые подходы. Так, исходя из модели Парлара – Виксона делают вывод, что необходимо максимально быстро нарастить противопожарные силы и средства и в кратчайшие сроки их вывести [5].

Целью данного исследования прием определены минимальных затрат на путь до очагов низового лесного пожара и на его локализацию.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать выбранный метод Кларка – Райта для расчета минимальных затрат на процессы выгрузки пожарного десанта и локализации низового лесного пожара соответственно;
- идентифицировать и охарактеризовать необходимое оборудование, используемое при локализации низового лесного пожара;
- с помощью псевдокода определить оптимальный путь и количество сотрудников МЧС в составе пожарного десанта.

## Аналитическая часть

Статистика реальной практики пожаротушения, в частности локализации пожаров, показывает, что доставка десанта авиалесоохраны в места пожара часто экономически не обоснована и от этого способа отказываются в пользу сброса воды. Однако этот способ не так эффективен в локализации низовых лесных пожаров. Поэтому следует рассмотреть программу по минимизации расходов на привлечение пожарного десанта [6, 7].

Для обеспечения оперативной ликвидации лесного пожара в районах применения наземных сил и средств пожаротушения силами группы (до 10 человек) с пожарной техникой и оборудованием подразделение лесопожарной организации обязано прибыть на место лесного пожара и приступить к его тушению в лесах.

При локализации низового лесного пожара применяется следующая техника и оборудование: пожарный модуль, топор-мотыга, ранцевый лесной огнетушитель [8].

Чтобы обеспечить организацию оптимального режима работы и отдыха работников, участвующих в тушении лесных пожаров, а также составление последующей схемы тушения, предлагается приведенная ниже постановка задачи.

Вертолет Ми-8МТВ-1 с максимальной вместимостью 24 пассажира доставляет пожарные десанты МЧС в места низовых лесных пожаров. Максимально возможная дальность полета вертолета 590 км. Обычно требуется построить такой маршрут доставки сотрудников МЧС до места локализации низового лесного пожара, чтобы время наращивания противопожарных сил и средств (в первую очередь, пожарного десанта) было минимальным. Известно необходимое расположение подразделений лесопожарных организаций, указаны секторы и участки низового лесного пожара.

Рассмотрим некоторые методы и алгоритмы по определению кратчайших путей, в том числе в области кольцевой маршрутизации.

Алгоритм Флойда – Уоршелла подразумевает нахождение наименьших путей в графе с ребрами, имеющими вес, отличный от нуля, тогда как циклы не могут быть меньше нуля. После исполнения алгоритма определяются суммарные веса наименьших путей от одной вершины к другой. Используя несложные модификации алгоритма, получится преобразовать пути.

Алгоритм Дейкстры — это алгоритм поиска кратчайших путей от начальной вершины графа до остальных. Применяется строго только для графов с отсутствием ребер, имеющих вес меньше нуля.

Ранее был произведен ряд исследований в области кольцевой маршрутизации. Так, Т.Д. Гаскелл в 1967 г. ввел параметр формы маршрута. В своей работе Х. Паесенс в 1988 г. учел асимметрию по расстоянию от склада до каждого из двух слитых клиентов. Б. Голден в 1998 г. осуществил применение генетического алгоритма. Д. Пеппер в 2002 г. использовал метод отжига [9]. Б. Чандран в 2003 г. при-

менил генетический алгоритм в одноэтапной процедуре настройки параметров [10]. Вывод работы 2005 г. Л.К. Алтинела и Т. Онкана состоял в том, что лучший комбинированный маршрут является лучшим [11].

Анализ факторов, влияющих на пожаробезопасность объекта, в том числе и на территории лесного массива, был проведен в работе [12].

Примерами моделей расчета корреспонденций могут служить гравитационная модель, энтропийная (Вильсона), а также модель семейства конкурирующих центров и промежуточных возможностей Стауффера.

Суть гравитационной модели состоит в следующем утверждении: корреспонденция из района  $i$  в район  $j$  пропорциональна общему объему отправления из центра  $i$ , общему объему прибытия из центра  $j$  и некоторой функции  $C(t_{ij})$ , зависящей от транспортного расстояния  $t_{ij}$  между центрами  $i$  и  $j$ . Благодаря параметрам учета скорости и удобства передвижений, созданных транспортной сетью, можно дать количественную оценку степени близости районов. В зависимости от вариаций моделей метод расчета этой характеристики будет отличаться.

Энтропийная модель описывает поведение пользователей сети. Пользователи случайным образом подразделяются по набору некоторых состояний. При расчете корреспонденций состоянием пользователя можно считать принадлежность его к корреспонденции из  $i$  в  $j$ . Состояние системы напрямую зависит от случайного и независимого выбора пользователями своих состояний. Основываясь на утверждении системного состояния энтропийной модели, можно сказать, что оно является состоянием с наивысшим показателем статистического веса.

Модели конкурирующих центров рассматриваются в виде гравитационной модели, которая включает в свою формулировку дополнительные факторы, такие как индекс посещаемости района прибытия. В структуре корреляции введение дополнительного фактора позволит произвести моделирование агломерационного эффекта в модели.

Модель Стауффера основана на утверждении, что объем корреспонденции на расстоянии от одного центра до другого определяется не только лишь расстоянием, а в большинстве случаев количеством посещений с альтернативной возможностью.

Описанные выше модели для расчетов оптимального пути не могут быть применены, так как обладают недостаточным учетом факторов. За основу исследования может быть взята модель распределения потоков [13] и их построения.

Метод последовательных приближений Франка – Вульфа — это итеративный алгоритм оптимизации первого порядка для выпуклой оптими-

зации с ограничениями. На каждом шаге алгоритм Франка – Вульфа рассматривает линейное приближение целевой функции и движется в направлении минимизации этой линейной функции (на том же множестве допустимых решений).

Расширенные модели равновесного распределения и оптимальных стратегий также относятся к моделям распределения потоков.

К моделям динамики транспортного потока относят макроскопические, кинетические и микроскопические модели. Примером микроскопических моделей может быть модель оптимальной скорости или модель Трайбера.

Макроскопическими являются модели, описывающие передвижение транспортных авиационных средств (летательных аппаратов) в скалярных или векторных физических величинах, таких как плотность, средняя скорость и т.п. При использовании данного подхода поток транспорта приравнивается к течению жидкости, из чего следует, что модель данного класса можно назвать гидродинамической [13].

Микроскопическими являются модели, моделирующие передвижение каждого летательного аппарата (ЛА) [13]. Такая комбинация в теории может помочь в достижении верного описания передвижения ЛА, сравнительно с описанием макроскопической модели. Не стоит забывать, что представленный подход на практике нуждается в значительных вычислительных ресурсах.

Кинетический подход заключается в полном распределении ЛА среди фазового пространства. Уравнение кинетики описывает динамику фазовой плотности. В его основе лежит усредненное представление взаимодействий эффектов. Кинетический подход по своему содержанию схож с моделью микроуровня. Теоретическое значение кинетических моделей состоит в том, что на их основе можно систематически выводить макроскопические модели [13].

Время прибытия к месту лесного пожара устанавливается на основе методических рекомендаций по применению сил и средств для тушения лесных пожаров<sup>1</sup>.

Метод Кларка – Райта — это эвристический метод для решения задач по маршрутизации перевозок. Он основан на понятии «сбережения», которое представляет снижение общей стоимости, получаемое при объединении маршрутов [14]. Принцип метода Кларка – Райта заключается в последовательном преобразовании мелких маршрутов в более крупные, до момента достижения минимальных значений характеристик маршрутов и выполнения различных ограничений. В дальнейшем предлагается

<sup>1</sup>Методические рекомендации по применению сил и средств для тушения лесных пожаров : Методические рекомендации МЧС России от 16.07.2014. № 2-4-87-9-18.

улучшение алгоритма. Помимо работ таких авторов, как Т.Д. Гаскелл, Х. Паесенс, Б. Голден, Д. Пеппер, Б. Чандрян, Л.К. Алтинел и Т. Онкан, в которых учитывается уточнение формулы выигрыша и последующая настройка независимых параметров, метод Кларка – Райта усовершенствовался алгоритмами Флойда – Уоршелла и Дейкстры [15].

Последние опубликованные модификации алгоритма строятся на возможности варьирования глубины срачивания маршрутов [16, 17], на основе изменения значений вероятности осуществления ухудшающего шага [18], на основе объединения маршрутов при нулевом выигрыше с применением эвристики, в которой любое не проигрышное объединение выгодно [19], а также на обмене ребер между маршрутами — улучшении нескольких маршрутов [20].

Описание метода Кларка – Райта в виде алгоритма достаточно часто встречается в работах, например [3, 14, 19, 20], в данном исследовании предлагается решение исходной задачи на основе следующего псевдокода.

1 **ФУНКЦИЯ** Метод Кларка – Райта

2 **ПАРАМЕТРЫ**

3 Г\_Р: массив расстояний между точками

4 Г\_Т: массив данных, сколько человек из пожарного десанта нужно на каждую точку

5 С: максимальная вместимость вертолета

6 Н: количество точек

7 **ПЕРЕМЕННЫЕ**

8 М\_Выигр: массив выигрышей от объединения двух маршрутов

9 М\_Марш\_Точ: массив распределения точек очагов лесного низового пожара по маршрутам

10 М\_Марш\_С: массив количества человек пожарного десанта на каждом маршруте

11 М\_Марш\_Кол: массив количества точек очагов лесного низового пожара в каждом маршруте

12 М\_Марш: массив, хранящий сами маршруты

13 М\_Сост\_Точ: массив состояний точек (1 – конечная точка или 0 – точка заблокирована)

14 М\_Очер: массив очереди пар точек для попыток объединения маршрутов

15 **НАЧАЛО ФУНКЦИИ**

16 #построение таблицы выигрышей

17 **ЦИКЛ** по И1 от 1 до Н

18 **ЦИКЛ** по И2 от И1 до Н

19 **ЕСЛИ** (И1 != И2)

20 М\_Выигр[И1][И2] := Г\_Р[0][И1] + Г\_Р[0][И2] - Г\_Р[И1][И2]

21 **ИНАЧЕ**

22 М\_Выигр[И1][И2] := 0

23 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

24 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

25 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

26 #инициализация массива маршрутов

27 **ЦИКЛ** по И1 от 1 до Н

28 М\_Марш\_Точ[И1] := И1

29 М\_Сост\_Точ[И1] := 1

30 М\_Марш\_С[И1] := Г\_Т[И1]

31 М\_Марш\_Кол[И1] := 1

32 М\_Марш[И1] := И1

33 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

34 #создание очереди пар точек для объединения

35 **ЦИКЛ** по И1 от 1 до Н

36 **ЦИКЛ** по И2 от И1 до Н

37 Добавление в М\_Очер **НОВЫЙ** элемент (И1, И2, М\_Выигр[И1, И2])

38 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

39 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

40 Сортировка элементов М\_Очер по убыванию 3 части каждого элемента

41 #Обработка всех пар точек

42 **ЦИКЛ** по Элем из И\_Очер

43 #Проверка на ненулевой выигрыш

44 **ЕСЛИ** Элем[3] <= 0

45 Выйти из цикла

46 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

47 #Проверка пары на возможность объединения маршрутов

48 #Обе точки являются конечными

49 **ЕСЛИ** М\_Сост\_Точ[Элем[1]] = 0

**ИЛИ** М\_Сост\_Точ[Элем[2]] = 0

50 Перейти к следующей итерации цикла

51 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

52 #Ввод вспомогательных локальных переменных

53 Марш\_Т1 := М\_Марш\_Точ[Элем[1]]

54 Марш\_Т2 := М\_Марш\_Точ[Элем[2]]

55 #Точки принадлежат разным маршрутам

56 **ЕСЛИ** Марш\_Т1 = Марш\_Т2

57 Перейти к следующей итерации цикла

58 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

59 #Проверка на вместимость вертолета (ограничение С)

60 **ЕСЛИ** М\_Марш\_С[Марш\_Т1] + М\_Марш\_С[Марш\_Т2] > С

61 Перейти к следующей итерации цикла

62 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

63 #Объединение маршрута

64 М\_Марш\_С[Марш\_Т1] := М\_Марш\_С[Марш\_Т1] + М\_Марш\_С[Марш\_Т2]

65 М\_Марш\_С[Марш\_Т2] := 0

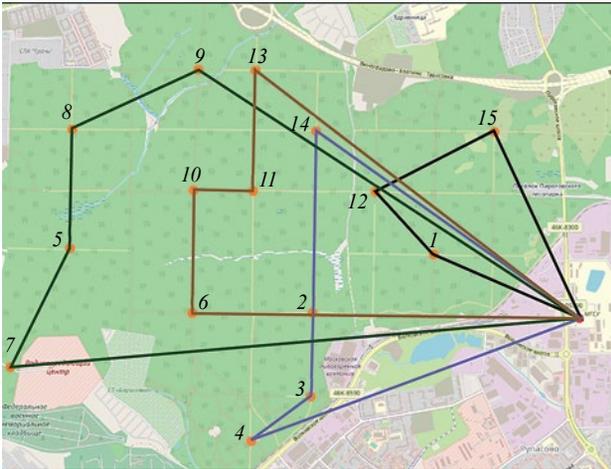
66 М\_Марш[Марш\_Т1] := М\_Марш[Марш\_Т1] Объединить с М\_Марш[Марш\_Т2]

67 Очистить М\_Марш[Марш\_Т2]

68 **ЕСЛИ** М\_Марш\_Кол[Марш\_Т1] > 1

69 М\_Сост\_Точ[Элем[1]] := 0

70 **КОНЕЦ ЕСЛИ**



Пример решения задачи тушения лесных пожаров силами авиационной охраны

An example of a solution to the problem of extinguishing forest fires by aviation forest air protection

```

71     ЕСЛИ М_Марш_Кол[Марш_Т2] > 1
72         М_Сост_Точ[Элем[2]]:=0
73     КОНЕЦ ЕСЛИ
74     М_Марш_Кол[Марш_Т1]:= М_Марш_
75     Кол[Марш_Т1] + М_Марш_Кол[Марш_Т2]
76     М_Марш_Кол[Марш_Т2]:=0
77     ЦИКЛ по И от 1 до Н
78         ЕСЛИ М_Марш_Точ[И] = Марш_Т2
79             М_Марш_Точ[И] := Марш_Т1
80     КОНЕЦ ЕСЛИ
81     КОНЕЦ ЦИКЛА
82     Вывод М_Марш
83     Вывод М_Марш_С
84     Подсчет и вывод длины маршрутов на основе
85     Г_Р и М_Марш
85 КОНЕЦ ФУНКЦИИ

```

Условное расположение подразделений лесопожарных организаций на территории Мытищин-

ского филиала МГСУ отмечено красным кружком (рисунок), указаны секторы и участки низового лесного пожара (оранжевые кружки, пронумерованные от 1 до 15), на каждый из которых необходим пожарный десант количеством 6 человек. Оптимальные кольцевые маршруты, рассчитанные в программе на языке C#, изображены ломаными линиями разных цветов (4 маршрута).

## Выводы

Выполнен обзор моделей задачи маршрутизации транспорта и методов их решения. Поставлена некоторая задача тушения лесных пожаров, развитие которых смоделировано в работе [5]. С помощью модифицированного алгоритма Кларка – Райта, который учитывает возможность варьирования глубины срачивания маршрутов и изменения значений вероятности осуществления ухудшающего шага, эффективность чего подтверждена в исследованиях [16, 18], и включает дальнейшее определение рационального значения такой вероятности, можно найти оптимальный путь и количество сотрудников МЧС в пожарном десанте. Для реализации базового метода Кларка – Райта предложен псевдокод, который был реализован в программном коде на C#. Решение на основе модифицированного алгоритма предложит кольцевые авиамаршруты, которые будут закреплены за летательным аппаратом, благодаря чему доставка пожарного десанта станет экономически обоснованной.

Данное исследование рассматривает поиск оптимального по времени пути перемещения сотрудников МЧС при тушении низовых лесных пожаров, что будет полезно аналитикам и разработчикам программного обеспечения для осуществления деятельности авиалесоохраны.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Beresneva E., Avdoshin S. Analysis of mathematical formulations of capacitated vehicle routing problem and methods for their solution // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2018. Vol. 30. Issue 3. Pp. 233–250. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-17
2. Vega-Mejia C.A., Neira E.M.G., Montoya-Torres J.R., Islam S.M.N. Using a hybrid heuristic to solve the balanced vehicle routing problem with loading constraints // International Journal of Industrial Engineering Computations. 2020. Vol. 11. Issue 2. Pp. 255–280. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.8.002
3. Achamu G., Berhan E. A classical heuristic algorithm implementation for logistic analysis of waste collection problem: a case of Addis Ababa Arada subicthy // Journal of EEA. 2021. Vol. 39. Pp. 97–113.
4. Kosasih W., Ahmad A., Laricha Salomon L., Febricky. Comparison study between nearest neighbor and farthest insert algorithms for solving VRP model using heuristic method approach // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 852. Issue 1. P. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/852/1/012090
5. Коляда А.В. Оптимизация процессов тушения лесного пожара с использованием имитационного моделирования // Ученые записки российского государственного социального университета. 2010. № 8. С. 89–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17066620>
6. Таранцев А.А., Чикитов Ю.И. Модель применения беспилотных летательных аппаратов в целях тушения крупных лесных пожаров

- в зоне применения наземных сил и средств // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 2. С. 21–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26183977>
7. Бородин В.А., Кузовлев А.В., Харитонов А.А. Тактика тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 1 (8). С. 83–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576096>
  8. Алаторцев А.С. Совершенствование организации тушения лесных пожаров в Самарской области : магистерская дис. Тольятти, 2017. 113 с.
  9. Pepper J., Golden B., Wasil E. Solving the traveling salesman problem with annealing-based heuristics: A computational study // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Hum. 2002. Vol. 32. Issue 1. Pp. 72–77. DOI: 10.1109/3468.995530
  10. Chandran B., Golden B., Wasil E. A computational study of three demon algorithm variants for solving the traveling salesman problem // Computational Modeling and Problem Solving in the Networked World. H.K. Barghava, N. Ye (eds). Boston : Kluwer Academic Publisher, MA, 2003. Pp. 155–175. DOI: 10.1007/978-1-4615-1043-7\_8
  11. Altinel I.K., Öncan T. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem // Journal of the Operational Research Society. 2005. Vol. 56. Issue 8. Pp. 954–961. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601916
  12. Черепанов Д.А., Ермаков А.С. Экспертная оценка пожарного риска для кемпинга с применением матрицы последствий и вероятностей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 2. С. 62–71. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.62-71
  13. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. Вып. 11. С. 3–46. URL: [https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option\\_lang=rus](https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option_lang=rus)
  14. Kristina S., Jason. Minimize transportation cost with Clark and Wright algorithm saving heuristic method with considering traffic congestion factor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 673. Issue 1. P. 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/673/1/012080
  15. Никоноров В.М. Усовершенствование метода Кларка – Райта для решения задачи маршрутизации автомобильных мелкопартионных перевозок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1. С. 295–298.
  16. Бронштейн Е.М., Зелев П.А. Об оптимальной доставке грузов транспортным средством с учетом стоимости перевозки от загрузки транспортного средства по нескольким циклическим маршрутам // Информатика и ее применения. 2014. Т. 8. № 4. С. 53–57. DOI: 10.14357/19922264140407 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846465>
  17. Бронштейн Е.М., Зелев П.А. Задача маршрутизации транспортного средства с учетом зависимости стоимости перевозок от загрузки // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 33–37.
  18. Зелев П.А., Бронштейн Е.М. Исследование эффективности модификаций алгоритма Кларка – Райта при решении задач доставки грузов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решения : тр. IV Междунар. конф. Уфа, 2016. С. 94–97.
  19. Коробова Л.А., Зеленова Е.Е. Модификация алгоритма Кларка – Райта для оптимизации работы городской транспортной компании : мат. LV отчет науч. конф. преподавателей и науч. сотрудников ВГУИТ за 2016 г. : в 3 ч. Ч. 2. / под ред. С.Т. Антипова. Воронеж : ВГУИТ, 2017. С. 111–114.
  20. Арташес С. Исследование некоторых классических алгоритмов задачи маршрутизации транспорта // World Science. 2019. Vol. 1. Issue 3 (43). Pp. 10–14. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/31032019/6398

## REFERENCES

1. Beresneva E., Avdoshin S. Analysis of mathematical formulations of capacitated vehicle routing problem and methods for their solution. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2018; 30(3):233-250. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-17
2. Vega-Mejia C.A., Neira E.M.G., Montoya-Torres J.R., Islam S.M.N. Using a hybrid heuristic to solve the balanced vehicle routing problem with loading constraints. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2020; 11(2):255-280. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.8.002
3. Achamu G., Berhan E. A classical heuristic algorithm implementation for logistic analysis of waste collection problem: a case of Addis Ababa Arada subicthy. *Journal of EEA*. 2021; 39:97-113.
4. Kosasih W., Ahmad A., Laricha Salomon L., Febricky. Comparison study between nearest neighbor and farthest insertalgorithms for solving VRP model using heuristic method approach. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 852(1):012090. DOI: 10.1088/1757-899X/852/1/012090
5. Kolyada A.V. Optimization of forest fire extinguishing processes using simulation modeling. *Scientific Notes of the Russian State Social University*. 2010; 8:89-94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17066620> (rus).
6. Tarantsev A.A., Chekistov Yu.I. Model of the unmanned aerial vehicles applying in purpose of forest

- firefighting in ground forces zone. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2016; 2:21-27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26183977> (rus).
7. Borodin V.A., Kuzovlev A.V., Kharitonov A.A. Forest fire extinguishing tactics. *Fire safety: problems and prospects*. 2018; 1(8):83-85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576096> (rus).
  8. Alatorsev A.S. *Improving the organization of extinguishing forest fires in the Samara region : master's thesis in specialty*. Togliatti, 2017; 113. (rus).
  9. Pepper J., Golden B., Wasil E. Solving the traveling salesman problem with annealing-based heuristics: A computational study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Hum.* 2002; 32(1):72-77. DOI: 10.1109/3468.995530
  10. Chandran B., Golden B., Wasil E. A computational study of three demon algorithm variants for solving the traveling salesman problem. *Computational Modelling and Problem Solving in the Networked World: Interfaces in Computer Science and Operations Research. Operations Research*. H.K. Barghava, N. Ye (eds). Boston, Kluwer Academic Publisher, MA, 2003; 155-175. DOI: 10.1007/978-1-4615-1043-7\_8
  11. Altinel I.K., Öncan T. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 2005; 56(8):954-961. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601916
  12. Cherepanov D.A., Ermakov A.S. Expert fire risk assessment camping with the use of a matrix of consequences and probability. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(2):62-71. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.62-71 (rus).
  13. Shvetsov V.I. Mathematical modeling of traffic flows. *Automation and Remote Control*. 2003; 11: 3-46. URL: [https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?](https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option_lang=rus)
  14. Kristina S., Jason. Minimize transportation cost with Clark and Wright algorithm saving heuristic method with considering traffic congestion factor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 673(1):012080. DOI: 10.1088/1757-899X/673/1/012080
  15. Nikonov V.M. Improvement of the Clark and Wright method for solving routing problems of small-party automobile transportation. *Scientific and Technical bulletin of SPbSTU*. 2012; 1:295-298. (rus).
  16. Bronstein E.M., Zelev P.A. About optimum delivery of freights by the vehicle taking into account dependence of cost of transportations on loading of vehicles on several cyclic routes. *Informatics and Applications*. 2014; 8(4):53-57. DOI: 10.14357/19922264140407 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846465> (rus).
  17. Bronstein E.M., Zelev P.A. The vehicle routing problem with the transportation cost dependence of vehicle loading. *Information Technologies*. 2014; 4:33-37. (rus).
  18. Zelev P.A., Bronstein E.M. *Investigation of the effectiveness of modifications of the Clark-Wright algorithm in solving cargo delivery problems : Proceedings of the fourth international conference "Information technologies of intellectual decision support"*. Ufa, 2016; 94-97. (rus).
  19. Korobova L.A., Zelenova E.E. *Modification of the Clark and Wright algorithm for optimizing the work of a city transport company : Materials of the LV reporting scientific conference of VSUIT teachers and researchers for 2016 : in 3 p. Part 2*. S.T. Antipov (Ed.). Voronezh, VSUIT, 2017; 111-114. (rus).
  20. Artashes S. Investigation of some classical algorithms of the transport routing problem. *World Science*. 2019; 1(3):10-14. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/31032019/6398 (rus).

Поступила 28.01.2023, после доработки 08.02.2023;

принята к публикации 10.03.2023

Received January 28, 2023; Received in revised form February 8, 2023;

Accepted March 10, 2023

### Информация об авторах

**ЕРМАКОВ Станислав Александрович**, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 638451; Scopus Author ID: 56073793500; ORCID: 0000-0002-9158-8801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

**ДМИТРИЕВ Артем Андреевич**, студент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0002-8293-678X; e-mail: 89020821214@mail.ru

### Information about the authors

**Stanislav A. ERMAKOV**, Senior Lecturer of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 638451; Scopus Author ID: 56073793500; ORCID: 0000-0002-9158-8801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

**Artem A. DMITRIEV**, Student of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8293-678X; e-mail: 89020821214@mail.ru

**ПОСТАНОГОВА Полина Федоровна**, студент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0003-1465-3005; e-mail: sud00@mail.ru

**ТОЛСТИКОВ Дмитрий Олегович**, студент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; ORCID: 0000-0003-3916-8452; e-mail: dimastarcraft2014@gmail.com

### **Вклад авторов:**

**Ермаков С.А.** — научное руководство, написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

**Дмитриев А.А.** — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

**Постаногова П.Ф.** — написание исходного текста, доработка текста.

**Толстик Д.О.** — разработка псевдокода, итоговые выводы.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Polina F. POSTANOGOVA**, Student of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1465-3005; e-mail: sud00@mail.ru

**Dmitriy O. TOLSTIKOV**, Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3916-8452; e-mail: dimastarcraft2014@gmail.com

### **Contribution of the authors:**

**Stanislav A. Ermakov** — scientific guidance, writing the source text, revision of the text, final conclusions.

**Artem A. Dmitriev** — writing the source text, revision of the text, final conclusions.

**Polina F. Postanogova** — writing the source text, revision of the text.

**Dmitriy O. Tolstikov** — pseudocode development, final conclusions.

*The authors declare no conflicts of interest.*

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 79–82  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):79-82

УДК 614.84

## Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

### АННОТАЦИЯ

Проведен анализ существующих способов тушения литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в системах накопления (хранения) электрической энергии (СНЭЭ). Представлены классификация, области применения и нормативные документы, регламентирующие выбор и проектирование СНЭЭ. Дано описание структуры и путей обеспечения пожарной безопасности СНЭЭ. Выполнено обобщение возможных технических решений с применением спринклерных и других систем по тушению и обнаружению пожаров в модулях хранения энергии. Рассмотрены рекомендации производителей огнетушащих веществ по тушению пожаров с участием ЛИА.

**Ключевые слова:** горение; взрыв; температура; огневые испытания; пожарная сигнализация; горючие материалы; электроприемники; номинальная энергия

**Для цитирования:** Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 79–82.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h\_a\_s@live.ru

## Modern methods of extinguishing lithium-ion accumulators. Part 2

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

### ABSTRACT

The analysis of existing methods of extinguishing lithium-ion accumulators (LIA) in electric energy storage (accumulation) systems (ESS) is provided. The classification, fields of application and normative documents regulating the selection and design of ESS are presented. The description of the structure and ways to ensure fire safety of ESS are provided. The possible technical solutions with the use of sprinkler and other systems for extinguishing and detecting fires in energy storage modules are summarized. The recommendations of extinguishing agent manufacturers on extinguishing fires involving LIA are considered.

**Keywords:** combustion; explosion; temperature; fire tests; fire alarms; combustible materials; electric receivers; rated energy

**For citation:** Kharlamenkov A.S. Modern methods of extinguishing lithium-ion accumulators. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):79-82 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h\_a\_s@live.ru



### ВОПРОС

В рубрике «Вопрос–ответ» журнала № 1 за 2023 г. [1] был представлен анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) различного типа, возможные варианты тушения отдельных ячеек и аккумуляторных сборок. По результатам анализа было установлено, что выбор огнетушащего вещества (ОВ) во многом зависит от количества ячеек (емкости) аккумуляторной сборки, типа ЛИА,

а также условий их эксплуатации, места размещения, хранения и транспортировки.

В силу того, что в состав батарей входит не только литий (соли лития), но и другие горючие вещества, то горение ЛИА следует относить к пожарам класса А, В, С, Е. Поэтому в качестве ОВ при тушении ЛИА могут успешно применяться различные химические и сухие порошки, вода, водная дисперсия вермикулита (AVD), огнетушащие микрокапсулы, состав F-500, хладоны HFC-227, Novec 1230 и др. [1].

В то же время в нормативных документах<sup>1, 2</sup> отсутствуют требования по тушению ЛИА. При этом горение металлического лития, относящегося к классу пожара D, часто приравнивают к горению ЛИА, что является некорректным. В ЛИА содержится 2–3 % металлического лития, что соответствует 8 г на 100 Вт·ч энергии (эквивалентное содержание лития – LEC). Для небольших аккумуляторных сборок с номинальной энергией до 6,2 кВт·ч суммарное содержание лития<sup>3</sup> не превышает 500 г. В системах накопления (хранения) электрической энергии (СНЭЭ), а также в тяговых аккумуляторах электромобилей (EVB) масса лития может достигать нескольких килограммов. Следовательно, пожары на СНЭЭ и EVB будут характеризоваться более серьезными последствиями.

Какие способы тушения применяются при возгорании ЛИА в системах накопления (хранения) энергии?

**ОТВЕТ**

С каждым годом расширяется область применения СНЭЭ. Темпы роста особенно заметны в крупных городах развитых стран, где лидирующие позиции занимают США, Китай [2]. По прогнозам на 2030 г. более 50 % всех СНЭЭ будут размещаться на их рынках.

Ведется активная реализация различных проектов по внедрению данных систем на территории России. На основе стандартов МЭК разработана серия «Системы накопления энергии». В ГОСТ Р 58092.2.1–2020<sup>4</sup> отмечается, что СНЭЭ разделяют на механические, электрохимические и электрические. Выбор того или иного типа СНЭЭ зависит от ее назначения и места установки, поэтому вводится дополнительная классификация систем (см. табл. 1).

Основными частями (подсистемами) СНЭЭ, используемыми в качестве накопителей энергии ЛИА, являются: подсистема контроля и управления; подсистема преобразования энергии; подсистема мониторинга и защиты ЛИА (BMS); система накопления и хранения энергии. Последняя подсистема представляет собой набор модулей с ЛИА различных типов, которые представляют наибольшую пожарную опасность. Реализуемые проек-

<sup>1</sup> СП 9.13130.2009. Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации : введен в действие 01.05.2009. М. : МЧС России, 2009.

<sup>2</sup> Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с Изменениями 21.05.2021) : утверждены постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 г. № 1479.

<sup>3</sup> ГОСТ Р МЭК 62281–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Первичные и вторичные литиевые элементы и батареи. Безопасность при транспортировании. Требования и методы испытаний : введен в действие 01.03.2021. М. : Стандартинформ, 2020.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 58092.2.1–2020 (МЭК 62933-2-1:2017). Национальный стандарт Российской Федерации. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Параметры установок и методы испытаний. Общее описание : введен в действие 01.11.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

**Таблица 1.** Классификация СНЭЭ и типовые цели их применения

Класс	Характеристика класса	Цель применения
А	Обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение непродолжительного рабочего цикла (например, заряд и разряд СНЭЭ менее чем за 1 ч)	Регулирование частоты сети
		Компенсация колебаний мощности
		Регулирование напряжения в узлах
		Смягчение последствий снижения качества питания
		Компенсация реактивной мощности
В	Обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение длительного рабочего цикла (например, заряд и разряд СНЭЭ более чем за 1 ч)	Срезание или смещение пиков нагрузок
С	Обеспечивает отдачу электрической мощности переменного тока в энергосистему во время аварийного режима при отсутствии внешнего источника питания	Бесперебойное питание

ты СНЭЭ, использующие в качестве накопителей энергии ЛИА, составляют 67 % от общего числа [3]. На этапе проектирования и монтажа для СНЭЭ, согласно ГОСТ Р 58092.3.1–2020<sup>5</sup>, должны быть предусмотрены меры по обеспечению пожарной безопасности. К ним можно отнести применение негорючих строительных материалов, установку противопожарных систем, систем вентиляции, устройств обнаружения газов и др. При выделении газов и мелкодисперсных частиц из аккумуляторных батарей, с целью минимизации опасности, следует использовать специальное оборудование, обеспечивающее обнаружение утечки, включение вытяжной вентиляции, а также специальное противопожарное оборудование, способное обеспечить ликвидацию возгорания веществ, трудно поддающихся тушению.

Нужно понимать, что в реакции горения аккумуляторной сборки СНЭЭ на начальных этапах принимает участие только малая часть лития, которая ограничивается десятками грамм. Пожары с участием ЛИА больших аккумуля-

<sup>5</sup> ГОСТ Р 58092.3.1–2020 (IEC TS 62933-3-1:2018). Национальный стандарт Российской Федерации. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования : введен в действие 01.11.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

торных сборок имеют затяжной характер. Выгорание одной ячейки (секции) запускает процесс воспламенения соседней с постепенным нарастанием доли лития, участвующего в горении. Поэтому раннее обнаружение неисправности или возгорания отдельной ячейки аккумуляторной сборки позволяет снизить последствия пожара и начать его своевременное тушение. Определение достаточного количества и типа ОВ является важной составляющей успешной ликвидации пожара с участием ЛИА.

Вода является наиболее дешевым средством тушения возгораний ЛИА на больших площадях, позволяет обеспечить охлаждение горячей и соседних ячеек аккумуляторной сборки, но имеет и определенные ограничения из-за хороших токопроводящих свойств. Поэтому применима только при условии обеспечения электробезопасности персонала, что по ГОСТ Р 58092.5.1–2018<sup>6</sup> относят к «электрическим опасностям». Для определения требуемой системы пожаротушения для обеспечения пожарной безопасности и противопожарной защиты людей и имущества данный стандарт указывает на необходимость проведения оценки риска пожара установок СНЭЭ (см. ГОСТ Р 58092.5.1–2018: раздел 6 и Приложение А).

Ведутся исследования<sup>7</sup> по выбору параметров спринклерных систем пожаротушения при горении различных типов ЛИА, входящих в состав СНЭЭ. Так, результаты проведенных натурных огневых испытаний [4] аккумуляторных сборок с ячейками типа LFP (литий-железо-фосфатные) и LMO/LNO (литий-марганцево/никель-оксидные) позволили определить безопасные расстояния от модулей хранения энергии до горючих и негорючих материалов, а также установить время работы системы водяного пожаротушения и расположения спринклеров (см. табл. 2). Было установлено, что тип батарей LMO/LNO обладает большей пожарной опасностью. Для модулей СНЭЭ с аккумуляторами типа LMO/LNO спринклерная система должна обеспечивать тушение на всей площади помещения, причем для горящего блока следует обеспечить проливку на 45 мин дольше, по сравнению с соседними блоками. Для модулей СНЭЭ с аккумуляторами типа LFP система тушения должна обеспечивать непрерывную подачу воды с помощью спринклеров в течение 90 мин на площади не менее 230 м<sup>2</sup>.

Помимо спринклерных систем пожаротушения для модулей накопления (хранения) энергии могут применяться локальные системы подачи различных огнетушащих веществ (азот, диоксид углерода, аргон) через вентиляци-

<sup>6</sup> ГОСТ Р 58092.5.1–2018 (IEC/TS 62933-5-1:2017). Национальный стандарт Российской Федерации. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Безопасность систем, работающих в составе сети. Общие требования : введен в действие 01.03.2019. М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>7</sup> Sprinkler Protection Guidance for Lithium-Ion Based Energy Storage Systems. Final Report // Fire Protection Research Foundation. 2019. 30 p. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Suppression>

**Таблица 2.** Минимальные расстояния между негорючими/горючими материалами и модулем хранения энергии

Тип ЛИА	Номинальная энергия ЛИА, кВтч	Минимальные расстояния, м	
		Негорючие материалы	Горючие материалы
<i>При наличии спринклерной системы пожаротушения</i>			
LFP	31	-	-
	83	0,9	1,5
LNO/LMO	47	-	-
	125	1,8	2,7
<i>При отсутствии спринклерной системы пожаротушения</i>			
LFP	31	Менее 0,9	1,2
	83	1,2	1,8
LNO/LMO	47	1,2	1,8
	125	2,4	4,0

онные отверстия модулей, совмещенные с аспирационными дымовыми пожарными извещателями [5, 6].

В другом исследовании<sup>8</sup> по горению стеллажей с картонными и пластиковыми упаковками ЛИА типа LCO (литий-кобальтовые) и NMC (литий-никель-марганец-кобальт-оксидные) различных размеров было об-

<sup>8</sup> Li-ion Batteries Hazard and Use Assessment Phase III: Sprinkler Protection Criteria for Lithium Ion Batteries Stored in Cartons. Final Report // Fire Protection Research Foundation. 2016. 54 p. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Hazardous-materials/RFLithiumIonBatteriesPhaseIII.ashx>

**Таблица 3.** Рекомендуемые объемы огнетушителей с AVD

Объем огнетушителя, л	Номинальная энергия ЛИА, Втч	Тип электроприемника (оборудования, помещения)
0,5	До 60	Телефоны, планшеты
1	60–100	Ноутбуки и т.п.
2	100–250	Электроинструмент
6	250–500	Склады с отходами переработки лития
9	500–750	Средства индивидуальной мобильности с электрическим приводом
25	Более 750	Электромобили
50		Зарядные станции бесперебойных систем резервного питания и модули СНЭЭ
100		Склады хранения ЛИА

наружено, что горение самой упаковки (особенно пластиковой) оказывает значительный вклад в тепло-выделение на начальных этапах (в течение первых 5 мин), а дальше в процесс «подключаются» сами ЛИА. Поэтому сработка спринклерной системы на начальной стадии пожара может полностью исключить участие в нем ЛИА. Результаты данного исследования также можно использовать для реализации эффективного тушения модулей СНЭЭ.

По причине отсутствия требований норм фирмы проводят самостоятельные исследования, на основании которых выпускают рекомендации по применению своих ОВ. Например, производитель AVD рекомендует [7] для различных вариантов аккумуляторных сборок огнетушители с объемами, представленными в табл. 3

Применение иных способов тушения пожаров с участием ЛИА в СНЭЭ требует дальнейших исследований и продолжается по сей день.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 89–96. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1199>
2. Новикова А. Накопители энергии: технологии и тренды // Рынок электротехники. 2022. № 4. С. 6–25. URL: [ites/default/files/RE\\_68\\_04\\_2022\\_web.pdf](ites/default/files/RE_68_04_2022_web.pdf)
3. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6 (148). С. 76–87. DOI: 10.46920/2409-5516\_2020\_6148\_76
4. Ditch B., Zeng D. Fire hazard of lithium-ion battery energy storage systems: 1. Module to rack-scale fire tests // Fire Technology. 2020. DOI: 10.1007/s10694-020-01041-6
5. Brandt S., Stephanie, Hülsen G., Schreiner M., Duric A., Zimmermann M. Fire detection tests to develop a fire protection concept for stationary lithium ion battery energy storage systems // AUBE'21/SUPDET 2021 : 17th International Conference on Automatic Fire Detection & Suppression. 2021. 10 p. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/Symposia/2021-SUPDET/Papers/Det-20-Brandt.ashx>
6. Conzen J., Lakshmipathy S., Kapahi A., Kraft S., Didomizio M. Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 18. P. 104932. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104932
7. Wang H., Sun Q., Guo J., Xie S., He Y., Chen X. The efficiency of aqueous vermiculite dispersion fire extinguishing agent on suppressing three typical power batteries // Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage. 2021. Vol. 18. Issue 2. P. 020901. DOI: 10.1115/1.4048368

Материал поступил в редакцию 28.03.2023

Received Marth 28, 2023

### Информация об авторе

**ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич**, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: [h\\_a\\_s@live.ru](mailto:h_a_s@live.ru)

### Information about the author

**Aleksandr S. KHARLAMENKOV**, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: [h\\_a\\_s@live.ru](mailto:h_a_s@live.ru)

## 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 общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

**2.5.** Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

**2.6.** Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписанной 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!