

2-2020

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

УПРАВЛЕНИЕ
ПОЖАРОВЗРЫВО-
БЕЗОПАСНОСТЬЮ
НА ОБЪЕКТАХ ТЭК
В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



26-я Международная выставка
технических средств охраны
и оборудования для обеспечения
безопасности и противопожарной защиты



securika
Moscow



a Hyve event



Москва, Крокус Экспо

11–14
августа
2020



Видеонаблюдение



Контроль
доступа



Охрана
периметра



Противопожарная
защита



Сигнализация
и оповещение



Автоматизация
зданий

РЕКЛАМА

securika-moscow.ru

Бесплатный билет
по промо-коду:

sec20p0





**УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —
ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"**

Адрес:

121596, Россия, г. Москва,
ул. Горбунова, д. 2, стр. 3, пом. II, комн. 12.

Журнал издается с 1992 г.,
периодичность — 6 номеров в год.
СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массо-
вых коммуникаций — свидетельство ПИ
№ ФС 77-43615 от 18 января 2011 г.
Префикс DOI: 10.18322.

РЕДАКЦИЯ:

Зав. редакцией **Корольченко О. Н.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Адрес редакции:

121596, Россия, г. Москва,
ул. Горбунова, д. 2, стр. 3, пом. II, комн. 12.

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

Журнал включен в перечень ведущих рецензи-
руемых научных журналов и изданий, реко-
мендованных ВАК России для публикации
трудов соискателей ученых степеней, в Рефе-
ративный журнал и базы данных ВИНТИ РАН,
в базу данных Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ), в базу данных Russian
Science Citation Index на платформе Web
of Science, 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 "Пожаро-
взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety"
только по согласованию с редакцией.
При цитировании ссылка обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность
за содержание представленных в редакцию
материалов и публикацию их в открытой
печати.
Мнение редакции не всегда совпадает с мне-
нием авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 15.04.2020.

Выход в свет 24.04.2020.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии ООО "Гран При"
(Россия, 152900, г. Рыбинск,
ул. Орджоникидзе, д. 57).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Корольченко Д. А., к. т. н., академик МАНЭБ (Национальный исследователь-
ский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В. В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбб, Ве-
ликобритания)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бакиров И. К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический уни-
верситет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

Барбин Н. М., д. т. н., профессор (Уральский государственный аграрный универ-
ситет, Екатеринбург, Россия)

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

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

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

Бурханов А. И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический уни-
верситет, Волгоград, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государ-
ственной службы, Будапешт, Венгрия)

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

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

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

Топольский Н. Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный
деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС
России, Москва, Россия)

Холщевников В. В., д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик
ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации
(Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Е. В. ГВОЗДЕВ
Методология синтеза адаптивной системы
комплексной безопасности на предприятии
жизнеобеспечения населения региона

6

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. И. НЕДОБИТКОВ
Исследование микротвердости медного
проводника автомобильной электрической сети,
подвергшегося токовой перегрузке

17

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

А. Г. ТАМРАЗЯН, Ю. Н. ЗВОНОВ
К оценке резервов несущей способности
железобетонных плит в условиях пожара

26

Т. Ю. ЕРЕМИНА, Ф. А. ПОРТНОВ
Проблемы и перспективы в области огнестойкости
деревянных конструкций для высотных зданий

34

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

И. В. САМАРИН
Управление пожаровзрывобезопасностью
на объектах ТЭК в особых условиях

44

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

А. Ю. АНДРЮШКИН, Е. О. АФАНАСЬЕВ,
Е. Н. КАДОЧНИКОВА
Эффективность применения вязких гидрогелей
при тушении горящих твердых веществ

53

ВОПРОС – ОТВЕТ

А. С. ХАРЛАМЕНКОВ
Современная молниезащита зданий
и сооружений. Часть 3

63

CONTENTS

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

E. V. GVOZDEV
Methodology for the synthesis of an adaptive
integrated security system at a regional
life support enterprise

ELECTRICAL ENGINEERING

A. I. NEDOBITKOV
Study of microhardness of a copper conductor
subjected to current overload in vehicle
electric mains

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

A. G. TAMRAZYAN, Yu. N. ZVONOV
To the estimation of emergency bearing capacity
of reinforced slabs in the case of fire

T. Yu. EREMINA, F. A. PORTNOV
Problems and perspectives of fire resistance for wooden
constructions in high-storey buildings

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

I. V. SAMARIN
Fire and explosion safety management at fuel
and energy facilities in special conditions

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

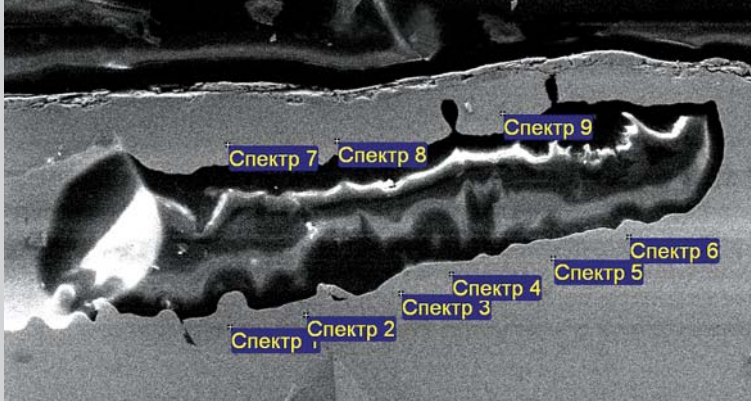
A. Yu. ANDRYUSHKIN, E. O. AFANASIEV,
E. N. KADOCHNIKOVA
Effectiveness of viscous hydrogel in extinguishing
burning solid substances

QUESTION – ANSWER

A. S. KHARLAMENKOV
Modern lightning protection of buildings
and constructions. Part 3

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

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



Исследование микротвердости медного проводника

Стр. 17



Резерв несущей способности железобетонных плит при пожаре

Стр. 26



Огнестойкость деревянных конструкций для высотных зданий

Стр. 34



Управление пожаровзрывобезопасностью ТЭК в особых условиях

Стр. 44



Стр. 53

Эффективность применения вязких гидрогелей при пожаротушении



FOUNDER and PUBLISHER —
“POZHNAUKA” Publishing House, Ltd.

Address:

Gorbunova St., 2, bldg. 3, office II, rm. 12,
Moscow, 121596, 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 77-43615 on January 18, 2011.
DOI prefix: 10.18322.

EDITORIAL STAFF:

Chief of Editorial Staff **O. N. Korolchenko**

Editorial Director **N. N. Sokolova**

Editor **L. V. Krylova**

Address of Editorial Staff:

Gorbunova St., 2, bldg. 3, office II, rm. 12,
Moscow, 121596, Russia.

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

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

E-mail: info@fire-smi

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, in Russian
Science Citation Index, 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 re-
produced in any form or by any means without
the prior permission of the Publishers. Repro-
ducing 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 15.04.2020.

Date of publication 24.04.2020.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printed at “Gran Pri”, Ltd.

(Ordzhonikidze St., 57, Rybinsk,
152900, Russian Federation).

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

V. V. Molkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern
Ireland, UK)

P. A. Strizhak, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD:

I. K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia,
Republic of Bashkortostan)

N. M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Urals State Agrarian University, Yekaterinburg,
Russia)

Berlin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences
(Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

Bogdanova V. V., 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, Saint Petersburg, Russia)

A. I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgo-
grad, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Manage-
ment, Budapest, Hungary)

R. L. Roe, Professor (Georgetown University Law Center, Washington, United States)

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

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

N. G. Topolskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural
Sciences, Academician of National Academy of Fire Science, Honoured Scientist of
the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

V. V. Kholshchevnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member
of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences
for Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation
(National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

ВЫСТАВКА-конференция
систем видеонаблюдения
и пожарно-охранной сигнализации

Security Ural



**3 – 5 июня
2020**

Екатеринбург
МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»

**ПОЛУЧИТЕ
БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ**
на сайте
security-ural.ru

ВАШ ПРОМОКОД
SU20PN



РЕКЛАМА

12+

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

Офис в Екатеринбурге
+7 (343) 226-04-29
security-ural@mvk.ru

security-ural.ru

Методология синтеза адаптивной системы комплексной безопасности на предприятии жизнеобеспечения населения региона

© Е. В. Гвоздев✉

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Решение задач, связанных с качественным оказанием услуг населению городов (водоснабжение, энергоснабжение, горячее водоснабжение, отопление, утилизация отходов), является неотъемлемой частью работы органов власти (региональных образований, регионов, субъектов, муниципалитетов, их округов). К организациям, оказывающим данные услуги, относятся предприятия жизнеобеспечения населения, в технологическом процессе которых, как правило, задействованы участки (площадки) опасных производственных объектов. На таких предприятиях предложено создавать систему комплексной безопасности, которая объединяет все отраслевые (ведомственные) подсистемы безопасности и является неотъемлемой частью их системы управления. Устойчивое функционирование рассматриваемых предприятий во многом зависит от ресурсной обеспеченности (финансовые и материальные средства, время, персонал и т. д.) созданной на предприятии системы комплексной безопасности, которая имеет ограничения по объему. До сих пор на практике распределение ресурса для поддержания комплексной безопасности осуществляется на основе интуитивных соображений руководителей направлений безопасности предприятия. При таком подходе созданная на предприятии система комплексной безопасности становится уязвимой.

Методы исследования. Проанализированы подходы с использованием существующих методов в комплексной безопасности предприятий, рассмотрены особенности их применения. Предложено совместное применение метода анализа иерархий и метода построения “дерева событий”, с помощью которых появляется возможность определить исходные иницирующие события, установить факт возникновения опасности, реализовать попытку спрогнозировать возможные сценарии воздействия опасностей на объекты защиты предприятий жизнеобеспечения населения.

Постановка задачи. Комплексная безопасность предприятий жизнеобеспечения населения характеризуется состояниями, рассматриваемыми в определенный момент времени, отклонение от параметров функционирования которых может привести к сбою в деятельности как отдельной отраслевой подсистемы безопасности, так и системы комплексной безопасности предприятия в целом. На основании информации об оценке риска в отраслевых подсистемах безопасности, их сопоставления между собой с точки зрения уровня воздействия требуется определить перечень мероприятий с учетом их физической реализуемости в условиях ограничений в обеспечении рассматриваемой системы ресурсами (финансовые и материальные средства, персонал).

Решение задачи. Предложен подход, позволяющий провести последовательную поэтапную оценку состояния системы комплексной безопасности предприятия, который основан на совместном применении методов анализа иерархий и построения “дерева событий” и характеризуется простотой применения, наглядностью, динамичностью, универсальностью и унифицированностью.

Выводы. Достоинством предлагаемого подхода является возможность наблюдать за изменением свойств состояния отраслевых подсистем безопасности, что позволит создать экспертную или интеллектуальную систему управления безопасностью предприятия. Использование представленного подхода даст возможность проводить дальнейшие исследования по совершенствованию методологии синтеза адаптивной системы комплексной безопасности предприятия, что имеет важное хозяйственное для России значение.

Ключевые слова: риск; устойчивость; надежность; качество; вероятность; ущерб; оценка.

Для цитирования: Гвоздев Е. В. Методология синтеза адаптивной системы комплексной безопасности на предприятии жизнеобеспечения населения региона // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 6–16. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.6-16.

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

Methodology for the synthesis of an adaptive integrated security system at a regional life support enterprise

© Evgeniy V. Gvozdev✉

National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Solving problems related to providing high-quality services to the population of cities (water supply, energy supply, hot water supply, heating, waste disposal) is an integral part of the work of government bodies (regional entities, regions, subjects, municipalities, and their districts). These include enterprises that provide life support to the population, in the technological process of which, as a rule, sections (sites) of hazardous production facilities are involved. At such enterprises, it is proposed to create a comprehensive security system that combines all industry (departmental) security subsystems and is an integral part of their management system. The sustainable functioning of the enterprises in question largely depends on the availability of resources (financial and material resources, time, personnel, etc.) of the integrated security system created at the enterprise, which has volume restrictions. Until now, in practice, the allocation of resources to maintain comprehensive security is based on the intuitive considerations of the company's security managers. When this approach is implemented, the integrated security system created at the enterprise becomes vulnerable.

Method of research. Approaches using existing methods in the complex security of enterprises are analyzed, and the features of their application are considered. A joint application of the hierarchy analysis method and the "tree of events" method is proposed, which makes it possible to determine the initial initiating events, establish the fact of hazard occurrence, and make an attempt to predict the possible effects of hazards on the objects of protection of life-support enterprises of the population.

Problem statement. Complex security of enterprises providing life support to the population is characterized by conditions considered at a certain time, deviation from the parameters of which can lead to a failure in the activities of a separate industry security subsystem, and in the activities of the complex technosphere security system of the enterprise as a whole. Based on information about the risk assessment in the industry security subsystems, their comparison with each other in terms of the level of impact, it is necessary to determine the list of measures taking into account their physical feasibility in the conditions of restrictions in providing the system with resources (financial and material resources, personnel).

Problem solution. The proposed approach to allow consistent, gradual assessment of the state of the complex system of technosphere safety of the company, which is based on the joint application of methods of analysis of hierarchies and the construction of "tree event" which is characterized by ease of use, clarity, dynamism, versatility and commonality.

Conclusion. The advantage of the proposed approach is the ability to observe changes in the properties of the state of industry security subsystems, which will allow you to create an expert or intelligent enterprise security management system. The use of this approach will allow us to conduct further research in improving the methodology for synthesizing the adaptive system of integrated enterprise security, which is of great economic importance for Russia.

Keyword: risk; stability; reliability; quality; probability; damage; assessment.

For citation: E. V. Gvozdev. Methodology for the synthesis of an adaptive integrated security system at a regional life support enterprise. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 6–16 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.6-16.

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

Введение

Показатель качества жизнеобеспечения населения (далее — ЖОН) России с точки зрения предоставления ему требуемого набора благ в виде услуг (водоснабжение, энергоснабжение, горячее водоснабжение, отопление, утилизация отходов) наглядно проявляется не только в период возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, но и в период повседневной деятельности функционирования предприятий, участвующих в ЖОН, в технологическом процессе которых, как правило, задействованы участки (площадки) опасных производственных объектов (далее — предприятия ЖОН). Предприятия ЖОН относятся к объектам, входящим в систему жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) регионов (муниципальных образований), т. е. они предоставляют населению России материальные средства и услуги по установленным нормам и нормативам в жизненно важных видах (ГОСТ Р 22.3.01–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Жизнеобеспечение населения в чрезвычайных ситуациях. Общие требования).

В структуру системы ЖКХ регионов (муниципальных образований) входят также предприятия ЖОН, участвующие в обеспечении населения России электрической энергией, теплом и горячим водоснабжением. В самом крупном в России Московском регионе бесперебойное качественное предоставление перечисленных жизненно важных услуг возложено на Публичное акционерное общество (ПАО) "Мосэнерго", самую крупную среди генерирующих компаний России, которая входит в структуру ПАО "Газпром" и обеспечивает Московский регион электрической энергией, теплом и горячим водоснабжением.

Поддержание устойчивого функционирования рассматриваемого предприятия ЖОН Московского региона будет обеспечено за счет выполнения мероприятий по защищенности и стойкости системы комплексной безопасности (далее — СКБ), объединяющей все отраслевые (ведомственные) подсистемы безопасности и являющейся неотъемлемой частью их системы управления. На рис. 1 представлена СКБ, которую предложено создавать на пред-



Рис. 1. Система комплексной безопасности, создаваемая на предприятии

Fig. 1. Integrated security system (ISS) created at the enterprise

приятия ЖОН и которая предназначена для устойчивого преодоления опасностей, квалифицируемых как ЧС природного или техногенного характера [1–3].

Для каждого из направлений безопасности (см. рис. 1) разработаны собственные требования, изложенные в различных федеральных законах: например, по промышленной безопасности — в Федеральном законе № 116-ФЗ “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (от 21.07.1997 г.), а по пожарной безопасности — в Федеральном законе № 69-ФЗ “О пожарной безопасности” (от 21.12.1994 г.). Механизм реализации требований, разрабатываемых в форме подзаконных актов, поручен ведомству (куратору), за которым закреплено направление безопасности. Работа ведомства направлена на совершенствование и разработку мероприятий по минимизации (исключению) риска в закрепленном за ним отраслевом направлении безопасности.

В мировой практике оценка безопасности техногенных объектов, основанная на использовании понятия риска аварии, находит широкое применение в различных отраслях промышленности [4, 5]. Требование к минимизации риска сформировалось как развитие понятий “надежность” и “безотказность” и характеризуется в том числе частотой негативных событий.

Первые исследования по риск-ориентированному подходу в промышленности как развитию представлений о надежности и безотказности можно отнести к началу 80-х годов прошлого столетия [6]. В настоящее время установлено, что показатель риска аварии должен быть основным показателем техногенной безопасности [7–10].

Устойчивое функционирование рассматриваемого предприятия ЖОН Московского региона во многом зависит от показателей ресурсной обеспе-

ченности (финансовые и материальные средства, время, персонал и т. д.) СКБ, созданной на предприятии, которые из-за отсутствия возможностей предприятия имеют ограничения, т. е. не способны покрыть в полном объеме запросы руководителей служб (отделов) — кураторов направлений комплексной безопасности.

Несмотря на то что сейчас для распределения ресурса в отраслевых направлениях безопасности (ведомствах) разработано и принято к исполнению множество различных методик (руководств), до сих пор каждым из них применяются различные, отличающиеся друг от друга подходы при использовании рисков или “факторных” показателей, сопоставление которых вызывает серьезные затруднения даже у специалистов-экспертов. Сделан вывод о том, что на практике распределение ресурса предприятия, предназначенного для комплексной безопасности, в виде единого объема осуществляется на основе интуитивных соображений руководителей (ведомственных) направлений безопасности.

При реализации такого подхода СКБ предприятия становится уязвимой в тех местах, где направления деятельности недостаточно обеспечены ресурсной поддержкой для их безопасного функционирования (рис. 2). Представленная в виде схемы на рис. 2 информация наглядно подтверждает наличие проблем в рассматриваемой области, что свидетельствует об актуальности исследований.

Цель настоящей работы — создать подход, основанный на комплексной оценке рисков в СКБ предприятия, который в целях их минимизации (исключения) позволит обосновать требуемый для рассматриваемой системы объем ресурсов.

Объектом исследования является СКБ, созданная на предприятии (ПАО “Мосэнерго”), включающая в себя множество отдельных (отраслевых) направлений безопасности и функционирующая в условиях ограничений в ресурсном обеспечении предприятия.

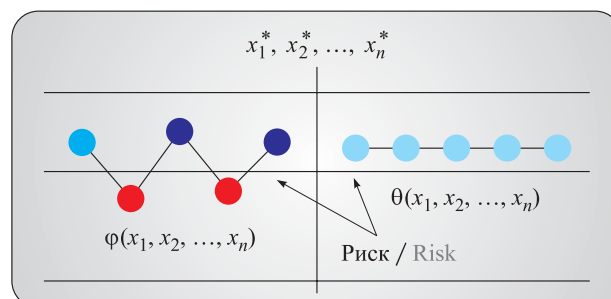


Рис. 2. Схема сравнения показателей обеспеченности подсистем безопасности

Fig. 2. Comparison scheme of security subsystem security indicators

Предметом исследования являются риски в подсистемах, входящих в СКБ предприятия, реализация которых может нанести вред двум и более отраслевым подсистемам безопасности.

Анализ исследований в обеспечении комплексной безопасности предприятий ЖОН

Проблеме комплексной безопасности предприятий ЖОН в настоящее время уделяется значительное внимание, так как она является составной частью национальной безопасности страны и требует совершенствования и достаточного ресурсного обеспечения для достижения главной цели — минимизации (исключения) риска возникновения опасностей, приводящих к ЧС.

При анализе безопасности и рисков, возникающих при эксплуатации предприятий ЖОН, установлено, что потенциальная опасность наступления на них ЧС, как и на других объектах техногенной инфраструктуры, обуславливается наличием следующих *инициирующих* факторов:

- 1) неконтролируемого выброса опасной энергии $E_i(\tau)$ (упругой, кинетической, тепловой, акустической, вибрационной);
- 2) неконтролируемого выброса опасных, в том числе горючих и отравляющих, веществ $W_i(\tau)$;
- 3) опасных нарушений и повреждений каналов передачи информационных потоков $I(\tau)$ в системах управления и регулирования технологическим процессом предприятий ЖОН (поражения блоков в АСУ ТП, в системах видеонаблюдения, связи и оповещения, в программных продуктах, в системах автоматизированной защиты) [11].

Последствия же, выраженные в виде ЧС, от воздействия указанных выше *инициирующих* факторов:

- рассматриваются по отношению к объектам защиты (персонал предприятия, здания, сооружения, оборудование, имущество);
- рассчитываются в виде характеризуемой степени повреждений (ущербов) (смерть или ущерб здоровью человека, значительные материальные потери);
- выражаются регламентированным временным интервалом не оказания услуг в ЖОН, превышение установленного значения которого рассматривается как ЧС, связанная с нарушением условий ЖОН.

Последняя формулировка имеет непосредственное отношение к предприятиям ЖОН, которые входят в систему ЖКХ региона (муниципального образования) и основу которых составляют предприятия электроэнергетики, водоснабжения и водоотведения, утилизации отходов и т. д.

В ходе анализа исследований, проводимых в комплексной безопасности организационных систем, рассматривались научные работы, выполненные российскими [7–10, 12–14] и зарубежными [15–17] исследователями.

В этих работах решались риск-ориентированные задачи (проблемы) с точки зрения комплексного подхода к анализу риска, его оценки и управления им, но детализированный вектор достижения цели был направлен в сторону одной из отраслевых подсистем безопасности (промышленной безопасности, пожарной безопасности, охраны труда, экологии и т. д.).

Отличие настоящей работы заключается в том, что комплексную безопасность предприятий ЖОН предлагается рассматривать, основываясь на взаимосвязи по риску между отраслевыми направлениями безопасности (промышленная и пожарная безопасность, защита от ЧС природного и техногенного характера, охрана труда и экологическая безопасность, антитеррористическая защищенность и т. д.), представляя ее в виде СКБ, создаваемой на предприятиях ЖОН.

Наряду с существующими критериями отнесения возникших опасностей к ЧС, показателями которых являются размеры ущербов, нанесенных населению, имуществу (оборудованию и т. д.), окружающей природной среде, в настоящем исследовании делается упор на последствиях, наступающих при превышении регламентированного временного интервала не оказания услуг в ЖОН и рассматриваемых как ЧС. Данный период времени имеет непосредственное отношение к предприятиям ЖОН, которые входят в систему ЖКХ региона (муниципального образования) и основу которых составляют предприятия электроэнергетики, водоснабжения и водоотведения, утилизации отходов и т. д.

При использовании математических моделей для решения проблемы комплексной безопасности на предприятиях ЖОН в основном предлагается использовать систему дифференциальных уравнений с нелинейными обратными связями вида:

$$\frac{\partial}{\partial t} X_i(t) = F_i(X_1, X_2, \dots, X_n; t), \quad (1)$$

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

где X_i — фазовые переменные, с помощью которых определяется состояние рассматриваемого объекта в момент времени t .

В число фазовых переменных, характеризующих состояние безопасности объектов ЖОН Московского региона, например, для энергетической компании ПАО «Мосэнерго», входит:

- перечень объектов (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС) предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе;

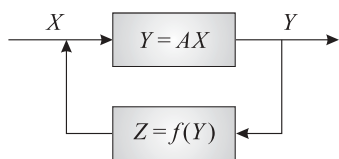


Рис. 3. Схема системы с обратной связью
Fig. 3. Diagram of feed-back system

- перечень объектов (зданий, сооружений и т. д.), закрепленных за каждым из объектов ПАО “Мосэнерго” (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС), предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе;
- численность населения, проживающего (находящегося временно) на территориях, закрепленных за каждым из объектов ПАО “Мосэнерго” (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС), предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе;
- число и характеристики источников возникновения опасностей на объектах ПАО “Мосэнерго” (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС), предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе;
- состав, количественная и качественная характеристика сил и средств, предназначенных для предупреждения и ликвидации ЧС на объектах ПАО “Мосэнерго” (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС), предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе.

На основе применения системы уравнений (1) будет описано поведение объекта в условиях возникновения опасностей при условии известности данных в правой части уравнения (1) с нелинейной обратной связью (рис. 3).

СКБ, созданная и функционирующая на предприятии, имеет обратную связь, учет значений которой играет принципиальную роль в управлении рисками [18].

При анализе устойчивости систем комплексной безопасности часто используется приближение суммы одинаково распределенных независимых случайных величин с конечными средними и дисперсией. В этом случае применяются доказательства, прописанные в законе нормального распределения плотности вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где μ — математическое ожидание (среднее значение);

σ — среднеквадратическое отклонение;

σ^2 — дисперсия распределения.

В упрощенном виде формула для данного закона может быть записана в виде

$$f(x) \approx \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right). \quad (3)$$

При обработке результатов статистики реализованных рисков в отраслевых направлениях безопас-

ности, входящих в СКБ предприятия, чаще используется предлагаемый к рассмотрению закон:

$$f(x) \approx x^{-\alpha}, \quad x \gg 1, \quad \alpha \approx 1. \quad (4)$$

Именно этот закон характеризует распределение числа пострадавших при некачественном оказании услуг, статистических данных по количеству аварий на объектах ПАО “Мосэнерго” (ТЭЦ, РТЭС, КТЭС), предоставляющих услуги по ЖОН в Московском регионе.

Перспективным же направлением, связанным с оценкой риска, является применение вейвлет-анализа как метода экспресс-диагностики и оперативного прогноза кризисного состояния. Методы вейвлет-анализа можно применять к данным различной природы, например к одномерным функциям или двумерным изображениям. Грубую классификацию вейвлет-алгоритмов можно осуществить путем выделения непрерывного (CWT — *Continuous Wavelet Transform*) и дискретного (DWT — *Discrete Wavelet Transform*) вейвлет-преобразований. В то же время набор вейвлет-коэффициентов гораздо быстрее можно получить в случае дискретного преобразования, причем он даст достаточно точное представление о сигнале при меньшем объеме получаемых в результате данных [19].

Так как в состав СКБ входит множество отраслевых подсистем безопасности (см. рис. 1), оптимальное функционирование рассматриваемой системы будет напрямую зависеть от показателей эффективности входящих в нее подсистем.

Постановку задачи для оценки рисков в комплексной безопасности предприятий ЖОН можно представить следующим образом.

Постановка задачи для оценки рисков в комплексной безопасности предприятий ЖОН

Комплексная безопасность предприятий ЖОН в каждый момент времени i характеризуется некоторыми состояниями x_i , управление которыми осуществляется с помощью мероприятий u_i (рис. 4).

Общий вид структуры оценки состояния СКБ приведен на рис. 5.

Требуется рассмотреть и обосновать последовательную реализацию задач по оценке СКБ с учетом временных показателей i :

1. На основании информации о состоянии комплексной безопасности x_i по фиксированным статистическим результатам происшедших за временной

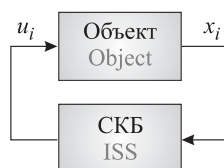


Рис. 4. Взаимодействие управляющего объекта с СКБ
Fig. 4. Interaction of the control object with ISS

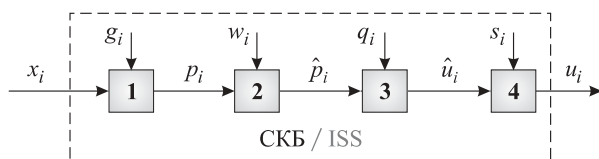


Рис. 5. Общий вид структуры оценки состояния СКБ

Fig. 5. General view of the structure for assessing the state of ISS

интервал событий (рассматриваемых как ЧС), когда было задействовано две и более отраслевых подсистем безопасности g_i , требуется определить *локальные показатели риска* для тех отраслевых подсистем, которыми была инициирована опасность p_i .

2. На основании информации о показателях риска p_i и характеризующей их информации w_i , рассматриваемой с точки зрения причинно-следственных связей, требуется определить критерии для *оценки глобального показателя рисков* СКБ $\hat{p}_i$.

3. На основании информации об оценке глобального показателя рисков СКБ $\hat{p}_i$ и результатов выявленных отклонений q_i от требований, утвержденных отраслевым направлением безопасности (чек-листы), требуется провести сопоставление мероприятий по устранению выявленных отклонений $\hat{u}_i$, которым присвоен собственный уровень (ранг), с точки зрения степени воздействия опасности на объекты защиты предприятия.

4. На основании информации об оценке рисков $\hat{p}_i$ в отраслевых подсистемах безопасности, проанализированных в виде мероприятий $\hat{u}_i$, и сопоставлении их между собой, а также о существующих на предприятии ограничениях в ресурсном (финансовые и материальные средства, персонал) обеспечении СКБ s_i требуется определить перечень мероприятий $\hat{u}_i$, которые будут реализованы в запланированный предприятием период с учетом их физической реализуемости.

Обоснование выбора методов исследования

Процессы управления комплексной безопасностью на различных предприятиях во многом аналогичны. Кроме того, во многом схожи и сопутствующие им проблемы, связанные с воздействием опасностей на объекты защиты. Выбор метода должен предполагать обоснованный и понятный способ рейтингования рисков возникновения опасностей. Выбор метода должен учитывать и количественную, и качественную информацию о предпочтениях лица, принимающего решения (юридического лица). Для совершенствования и развития комплексной безопасности необходим метод, позволяющий по универсальным правилам решать задачи (проблемы) с учетом их реальной сложности и существующих на предприятиях ЖОН ограничений в ресурсном обеспечении [20].

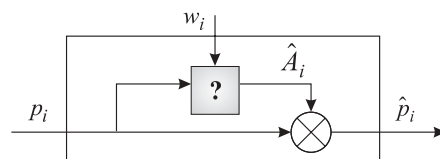


Рис. 6. Алгоритм ранжирования показателей в общем виде

Fig. 6. Algorithm for ranking indicators in general

В предыдущем разделе при описании последовательности реализации задач управления СКБ наиболее сложное решение отнесено ко 2-му и 3-му блокам рассматриваемой задачи, которые должны представляться в виде зависимостей (нарушения — требования; опасность — значимость для безопасности), расчета параметров (весовых коэффициентов), показателей безопасности и ранжирования их по значимости воздействия на безопасность. Решение представленных задач можно описать следующим выражением:

$$\hat{p}_i = p_i + \hat{A}_i p_i = (I + \hat{A}_i) p_i, \quad (5)$$

где $p_i = 0$ (нет i -го нарушения) или $p_i = 1$ (есть i -е нарушение);

$\hat{A}_i = \text{diag}(\hat{a}_i^j)$ — диагональная матрица искомых весовых коэффициентов (рис. 6).

Парные сравнения ($p_i = 0$, $p_i = 1$) приводят к записи характеристик сравнений в виде квадратной таблицы чисел, которая называется матрицей.

Сравнивая набор показателей с точки зрения важности, получим следующую матрицу:

$$\hat{A}_i = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Эта матрица обратна симметричная, т. е. имеет место свойство

$$a_{ij} = 1/a_{ji}. \quad (7)$$

Представленному выше описанию во многом отвечает метод анализа иерархий (далее — МАИ). МАИ — методологическая основа для решения задач выбора альтернатив посредством их многокритериального рейтингования. МАИ создан американским ученым Томасом Саати и вырос в настоящее время в обширный междисциплинарный раздел науки, имеющий строгие математические многовариантные обоснования [15].

На основе МАИ предлагается составить список *всех возможных рисков возникновения ЧС* (задействовано две и более отраслевых подсистем безопасности) p , далее с привлечением экспертов оценить значимость каждого показателя $\hat{A}_i = \text{diag}(\hat{a}_i^j)$ с учетом некоторой обобщенной для всех возможных случаев информации (опыта экспертов) w (рис. 7).

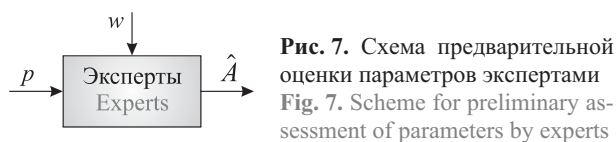


Рис. 7. Схема предварительной оценки параметров экспертами
Fig. 7. Scheme for preliminary assessment of parameters by experts

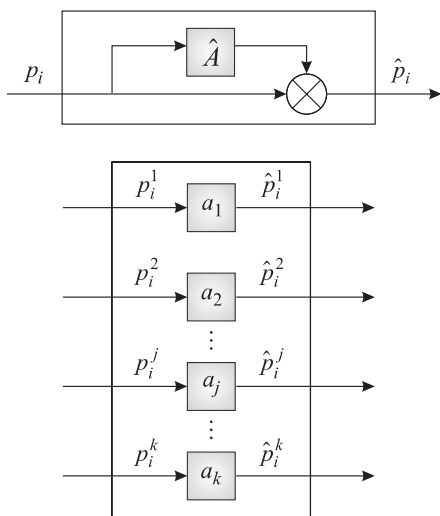


Рис. 8. Статический алгоритм ранжирования показателей
Fig. 8. Static ranking algorithm for indicators

Далее предлагается оценивать текущее состояние СКБ предприятия ЖОН путем суммирования параметров, соответствующих k выявленным отклонениям от установленных в отраслевом направлении безопасности требований, в виде выражения

$$K = \sum a_k. \quad (8)$$

В результате решение задачи, связанной с ранжированием показателей опасности, будет иметь вид, представленный на рис. 8.

Достоинством применения МАИ является возможность произвести параметризацию всех рисков

вследствие обеспечения статичности блоков 2 и 3 (ранжирования рисков), инициирование которых приведет к возникновению ЧС [21].

Однако предлагаемый метод позволяет решить задачу в блоках 2 и 3, но не способен охватить остальные блоки (1 и 4) (см. рис. 4).

Для решения задачи в полном объеме (во всех четырех блоках) требуется обеспечить статичность всех рассматриваемых блоков, сделать так, чтобы их “внутренняя часть” зависела от состояния отраслевых подсистем, входящих в СКБ, а на выходе каждого из блоков формировалась общая информация о состоянии СКБ предприятия. Для решения задачи в такой постановке применимы два возможных подхода. *Первый* основан на математическом моделировании процессов управления в системе. В практической деятельности предприятий из-за определенной сложности математических моделей он мало применяется. *Второй* подход основан на логико-вероятностных моделях системы — построения дерева (причинно-следственных связей) всех возможных событий в системе (рис. 9).

Такой подход широко применяется на практике, особенно при решении задач, связанных с анализом управления безопасностью технических систем, которые успешно решаются с помощью метода построения “дерева событий” [22].

Однако метод построения “дерева событий” должен быть сопряжен с представленным выше МАИ, т. е. при их совместном применении обеспечивать комплексность для получения требуемых показателей в такой сложной системе, как СКБ.

Совместное применение методов МАИ и построения “дерева событий” позволит определить исходное инициирующее событие, установить факт возникновения опасности, реализовать попытку предотвратить в будущем, ответив на следующие вопросы:

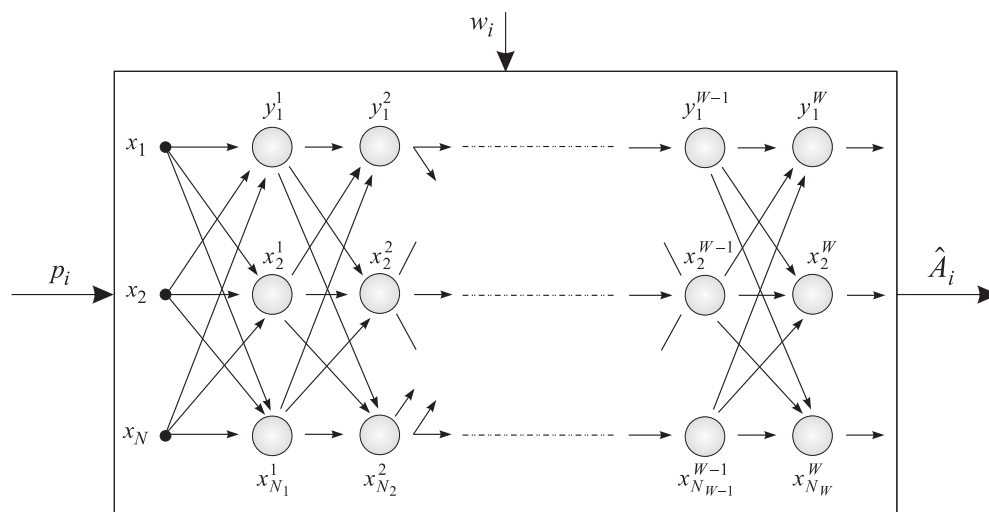


Рис. 9. Схема расчета показателей опасности с помощью метода построения “дерева событий”
Fig. 9. The scheme of calculation of risk indicators using the method of constructing the “tree of events”

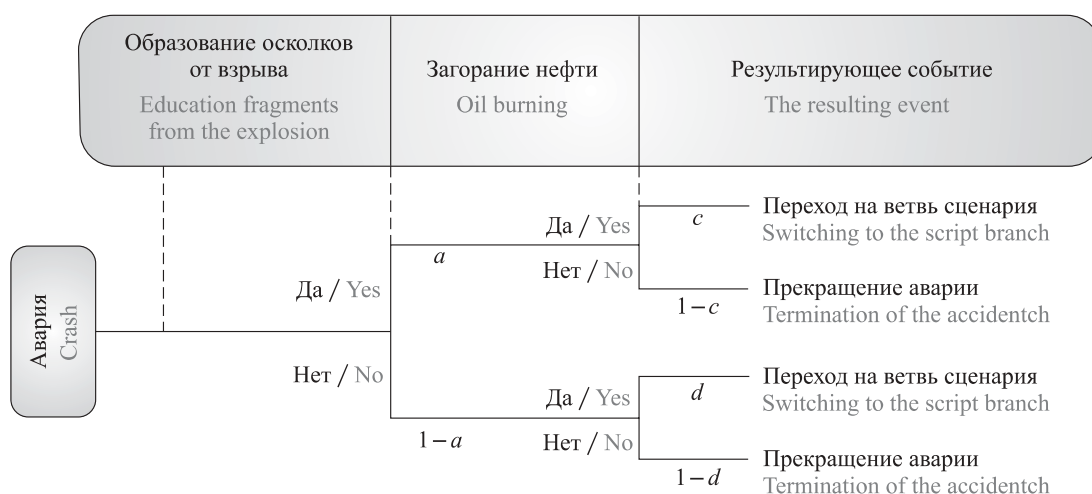


Рис. 10. “Дерево событий” для случая взрыва (пожара) емкости для хранения нефтепродуктов

Fig. 10. “Event tree” for the event of an explosion (fire) of a tank for storing petroleum products

- Что произойдет после возникновения опасности?
- Какие сценарии развития ситуации могут быть реализованы при возникновении вторичных факторов опасности, при ее воздействии на две и более отраслевых подсистем безопасности?
- Какой предполагаемый масштаб ущерба может быть нанесен СКБ и с какой вероятностью?

Пример построения дерева событий представлен на рис. 10.

При совместном рассмотрении двух рассмотренных методов (МАИ + метод построения “дерева событий”) будет обеспечена статичность блоков 1–4 (см. рис. 4), правильно построенное дерево не будет коренным образом меняться в процессе работы системы, а на выходе в динамике будут сформированы различные значения для разных сочетаний возникновения опасностей и показателей ущерба от их воздействий.

Достоинством представленного комплексного подхода являются следующие качественные характеристики:

1. *Простота.* Для управления СКБ потребуется только выявлять отклонения от установленных требований и заносить их в базу данных. Все остальное будет преобразовано в требуемую форму запрограммированной технической системой в режиме реального времени.

2. *Наглядность.* Использование технической системы позволит рассмотреть всю цепочку “причина – событие – следствие”, тогда неочевидные опасности станут наглядными.

3. *Динамичность.* Представленный подход в явном виде с высоким быстродействием позволит при управлении СКБ решать динамические задачи, описание которых было представлено ранее.

4. *Комплексность.* Это прямой путь к полной автоматизации управления СКБ, в перспективе с орга-

низацией и заменой людей запрограммированными техническими системами (роботами).

5. *Трудоёмкость.* Привлечение экспертов (ученых, статистиков, практиков и т. д.) будет носить разовый характер. Они не будут постоянно оценивать выявленные отклонения, а значит, включать их в штат организации не потребуется.

6. *Универсальность.* Поскольку вопросы комплексной безопасности актуальны не только для предприятий ЖОИ, но и для организаций любых отраслей промышленности всех форм собственности и масштабов производства, появится возможность в использовании всеми предприятиями запрограммированной технической системы. Особенности будут обусловлены требованиями отраслевых (узкоспециальных) правил безопасности, объем которых невелик.

7. *Унифицированность.* Представляется возможность применять данный подход для разработки программного комплекса, используемого надзорными (контрольными) органами. Если для всех отраслевых направлений безопасности будет действовать единая система оценки, то в режиме реального времени органы надзора (контроля) смогут получать информацию о состоянии комплексной безопасности во всех поднадзорных (подконтрольных) организациях. Отсюда появляется возможность регулировать периодичность проводимых проверок, реализовывать требования по риск-ориентированному подходу к проведению надзора (контроля), связанного с комплексной безопасностью предприятий.

Выводы

Представлен концептуальный подход к решению проблемы комплексной безопасности на предприятиях ЖОИ. Реализация подхода в предлагаемой постановке на основе рисков позволит проводить на-

блюдение за изменением свойств отраслевых подсистем безопасности, входящих в СКБ предприятий.

Научную основу дальнейшей работы будет представлять подробное исследование и теоретическое описание блоков (см. рис. 5), которое будет включено в содержание методики оценки состояния СКБ предприятия, с помощью которой будет решена поставленная в статье задача. Именно отсутствие в данный момент предлагаемой для использования методики является тормозом развития и совершенствования СКБ.

В перспективе при реализации представленного подхода может быть создана экспертная или интел-

лектуальная система управления безопасностью предприятия.

Реализация предлагаемого подхода позволит повысить устойчивость функционирования СКБ на объектах ЖОН регионов (муниципальных образований), а при использовании на других предприятиях — перевести их СКБ на более высокий качественный уровень.

В итоге реализация представленного к рассмотрению подхода в перспективе даст возможность разработать методологию синтеза адаптивной СКБ для решения научной проблемы динамического управления комплексной безопасностью предприятия, что имеет важное хозяйственное значение для России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев Е. В., Матвиенко Ю. Г. Комплексная оценка риска на предприятиях жизнеобеспечения, имеющих опасные производственные объекты // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 10. — С. 69–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78.
2. Гвоздев Е. В., Бутузов С. Ю., Сулима Т. Г., Арифджанов С. Б. Формализованная модель оценки надежности тепловых электрических станций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 2. — С. 47–56. DOI: 10.18322/PVB/2019.28.02.47-56.
3. Gvozdev E. V., Cherkina V. M. The modern strategy to the process of managing complex security of the enterprise on the basis of rational centralization // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). — 2019. — Vol. 9, Issue 1. — P. 4614–4620. DOI: 10.35940/ijitee.A4944.119119.
4. Risk-based inspection. API Recommended Practice 580. — 2nd ed. — November 2009. — 84 p. URL: <https://www.iranpm.ir/wp-content/uploads/2013/08/API-RP-580-Risk-Based-Inspection-2009.pdf> (дата обращения: 02.03.2020).
5. Risk-Based Inspection Technology. API Recommended Practice 581. — 2nd ed. — September 2008. — 654 p. URL: <https://www.iranpm.ir/wp-content/uploads/2011/08/API-581-2008.pdf> (дата обращения: 02.03.2020).
6. Хенли Э. Дж., Куамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1984. — 582 с.
7. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности / Под ред. Н. А. Махутова. — М. : Знание, 2015. — 935 с.
8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под ред. Н. А. Махутова. — М. : Знание, 2018. — 1016 с.
9. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности / Под ред. Н. А. Махутова. — М. : Знание, 2017. — 992 с.
10. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности / Под ред. Н. А. Махутова. — В 4 ч. — М. : Знание, 2007. — Ч. 4. — 864 с.
11. Махутов Н. А., Матвиенко Ю. Г., Романов А. Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. — М. : URSS, 2018. — 720 с.
12. Гордиенко Д. М. Пожарная безопасность особо опасных и технически сложных производственных объектов нефтегазового комплекса : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2018. — 480 с.
13. Новиков В. В. Разработка теории и методов создания систем управления безопасностью труда на предприятиях машиностроения : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2013. — 429 с.
14. Мельникова Д. А. Теоретические и практические аспекты построения системы управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах (на примере ООО “Газпром трансгаз Самара”) : дис. ... канд. техн. наук. — Самара, 2016. — 120 с.
15. NFPA 14–2019. Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems. — Quincy, MA : NFPA, 2019. — 67 p.

16. Aneiba A., Melad M. Performance evaluation of AODV, DSR, OLSR, and GRP MANET routing protocols using OPNET // International Journal of Future Computer and Communication. — 2016. — Vol. 5, No. 1. — P. 57–60. DOI: 10.18178/ijfcc.2016.5.1.444.
17. Billinton R., Li W. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods. — Boston, MA : Springer, 1994. — 351 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3.
18. Gandossi L., Simola K., Shepherd B. The link between risk-informed in-service inspection and inspection qualification // Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2009. — Vol. 51, Issue 1. — P. 16–20. DOI: 10.1784/insi.2009.51.1.16.
19. Шумов А. Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных : дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2001. — 125 с.
20. IAEA-TECDOC-1400. Improvement of in-service inspection in nuclear power plants. — Vienna, Austria : IAEA, 2004. — 35 p.
21. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М. : Радио и связь, 1993. — 278 с. URL: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/saaty.pdf> (дата обращения: 05.01.2020).
22. Горев В. А. Надежность технических систем и техногенный риск. — М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2018. — 120 с.

REFERENCES

1. E. V. Gvozdev, Yu. G. Matvienko. Comprehensive risk assessment at the life support enterprises with hazardous production facilities. *Bezopasnost truda v promyshlennosti / Occupational Safety in Industry*, 2019, no. 10, pp. 69–78 (in Russian). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78.
2. E. V. Gvozdev, S. Yu. Butuzov, T. G. Sulima, S. B. Arifjanov. Formal model of evaluating the reliability of thermal power plants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 47–56 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB/2019.28.02.47-56.
3. E. V. Gvozdev, V. M. Cherkina. The modern strategy to the process of managing complex security of the enterprise on the basis of rational centralization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 9, issue 1, pp. 4614–4620. DOI: 10.35940/ijitee.A4944.119119.
4. *Risk-based inspection. API Recommended Practice 580*. 2nd ed. November 2009. 84 p. Available at: <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2013/08/API-RP-580-Risk-Based-Inspection-2009.pdf> (Accessed March 2, 2020).
5. *Risk-Based Inspection Technology. API Recommended Practice 581*. 2nd ed. September 2008. 654 p. Available at: <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2011/08/API-581-2008.pdf> (Accessed March 2, 2020).
6. E. J. Henley, H. Kumamoto. *Reliability of engineering and risk assessment*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1981 (Russ. ed.: E. J. Henley, H. Kumamoto. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 582 p.).
7. N. A. Makhutov (ed.). *Bezopasnost Rossii. Pravovyye, sotsialno-ekonomicheskiye i nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Nauchnyye osnovy tekhnogennoy bezopasnosti* [Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Scientific bases of technogenic safety]. Moscow, Znaniye Publ., 2015. 935 p. (in Russian).
8. N. A. Makhutov (ed.). *Bezopasnost Rossii. Pravovyye, sotsialno-ekonomicheskiye i nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Tekhnogennaya, tekhnologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost* [Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Man-made, technological and technosphere safety]. Moscow, Znaniye Publ., 2018. 1016 p. (in Russian).
9. N. A. Makhutov (ed.). *Bezopasnost Rossii. Pravovyye, sotsialno-ekonomicheskiye i nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy kompleksnoy bezopasnosti* [Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Fundamental and applied problems of complex security]. Moscow, Znaniye Publ., 2017. 992 p. (in Russian).
10. N. A. Makhutov (ed.). *Bezopasnost Rossii. Pravovyye, sotsialno-ekonomicheskiye i nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Analiz riska i problem bezopasnosti* [Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Analysis of risk and security problems]. In 4 parts. Moscow, Znaniye Publ., 2007. Part 4, 864 p. (in Russian).
11. N. A. Makhutov, Yu. G. Matvienko, A. N. Romanov. *Problemy prochnosti, tekhnogennoy bezopasnosti i konstruksionnogo materialovedeniya* [Problems of strength, technogenic safety and structural materials science]. Moscow, URSS Publ., 2018. 720 p. (in Russian).

12. D. M. Gordienko. *Fire safety of particularly dangerous and technically complex production facilities of the oil and gas complex*. Dr. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2018. 480 p. (in Russian).
13. V. V. Novikov. *Development of theory and methods for creating occupational safety management systems at machine-building enterprises*. Dr. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2013. 429 p. (in Russian).
14. D. A. Melnikova. *Theoretical and practical aspects of building an industrial safety management system at hazardous production facilities (for example, Gazprom transgaz Samara LLC)*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Samara, 2016. 120 p. (in Russian).
15. *NFPA 14–2019. Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems*. Quincy, MA, NFPA, 2019. 67 p.
16. A. Aneiba, M. Melad. Performance evaluation of AODV, DSR, OLSR, and GRP MANET routing protocols using OPNET. *International Journal of Future Computer and Communication*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 57–60. DOI: 10.18178/ijfcc.2016.5.1.444.
17. R. Billinton, W. Li. *Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods*. Boston, MA, Springer, 1994. 351 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3.
18. L. Gandossi, K. Simola, B. Shepherd. The link between risk-informed in-service inspection and inspection qualification. *Insight—Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2009, vol. 51, issue 1, pp. 16–20. DOI: 10.1784/insi.2009.51.1.16.
19. A. B. Shitov. *Development of numerical methods and programs related to the use of wavelet analysis for modeling and processing experimental data*. Cand. Sci. (Phys.-Math.) Diss. Moscow, 2001. 125 p. (in Russian).
20. *IAEA-TECDOC-1400. Improvement of in-service inspection in nuclear power plants*. Vienna, Austria, IAEA, 2004. 35 p.
21. Saati T. Decision Making. Method for analyzing hierarchies. URL: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/saati.pdf> (Accessed 05.01.2020).
22. V. A. Gorev. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogenny risk* [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Moscow, MISI–MGSU Publishing House, 2018. 120 p. (in Russian).

Поступила 03.03.2020, после доработки 27.03.2020;
принята к публикации 02.04.2020

Received March 3, 2020; Received in revised form March 27, 2020;
Accepted April 2, 2020

Информация об авторе

ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

Information about the author

Evgeniy V. GVOZDEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке

© А. И. Недобитков✉

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Приведенные в статье данные наглядно показывают насущную необходимость обеспечения пожарной безопасности автотранспортных средств. Целью статьи является обоснование применения метода измерения микротвердости при исследовании медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и внешнему высокотемпературному воздействию, для установления причины его повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, а также микротвердомера DuraScan 20.

Результаты и их обсуждение. Экспериментально доказано, что микротвердость медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке, и медного проводника, подвергшегося внешнему высокотемпературному воздействию, существенно различаются. Даны снимки участков измерения микротвердости медного проводника, подвергшегося воздействию сверхтока. Приведены результаты энергодисперсионного анализа и характерные диагностические признаки, позволяющие идентифицировать причину повреждения медного проводника при пожаре (высокотемпературный отжиг или токовая перегрузка). Установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля.

Выводы. Предложен метод дифференциации повреждения медного проводника при пожаре (токовая перегрузка, внешнее высокотемпературное воздействие). Показано также, что метод измерения микротвердости можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и в конечном счете причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; сверхток; медь; растровая электронная микроскопия; диагностический признак; пожарно-техническая экспертиза; микротвердомер.

Для цитирования: Недобитков А. И. Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергнутого токовой перегрузке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 17–25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25.

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

Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains

© Alexandr I. Nedobitkov✉

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

ABSTRACT

Introduction. The data presented in the article clearly demonstrate the urgent need to ensure fire safety of vehicles. The aim of the article is to justify the use of measuring microhardness method in fire-technical expertise of a copper conductor subjected to current overload and external high-temperature impact to determine the cause of its damage.

Materials and methods. The studies were carried out with a JSM-6390LV scanning electron microscope with an add-on device for energy dispersive microanalysis as well as a DuraScan 20 microhardness tester.

Results and discussion. It has been experimentally proved that the microhardness of a copper conductor subjected to current overload differs significantly from the microhardness of a copper conductor subjected to an external high-temperature impact. Pictures of microhardness measurement sites of a copper conductor subjected to overcurrent are given in the article. The study presents the results of energy dispersive analysis and characteristic

diagnostic features which make it possible to identify the cause of damage to the copper conductor in fire (high temperature annealing or current overload). It has been found that the identified signs are stable and not subject to changes in the natural conditions of car storage.

Conclusion. A method for differentiating damage to a copper conductor in case of fire (current overload, external high-temperature effect) has been proposed in the article. It is also shown that the method of measuring microhardness can be used in examination of copper conductor fragments as an auxiliary method to the main examination method — scanning microscopy. The data presented in the article can be used by experts in expert studies of copper conductors taken from fire sites to determine the mechanism of their damage and, ultimately, the cause of a vehicle fire.

Keywords: fire; overcurrent; copper; scanning electron microscopy; diagnostic sign; fire-technical expertise; microhardness tester.

For citation: A. I. Nedobitkov. Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 17–25 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25.

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

Введение

Пожары, представляя собой тяжелую чрезвычайную ситуацию (ЧС), наносят значительный ущерб экономике государств [1–3].

Авторами работ [4–14] показано, что при исследовании сгоревшего автотранспортного средства практически всегда рассматривается так называемая “электрическая” версия возникновения пожара. В работах [15–17] отмечается динамика роста пожаров на электромобилях, анализируются некоторые причины и условия их возникновения. Таким образом, в ближайшем будущем в качестве основных версий причины пожара на автомобиле будут рассматриваться техническое состояние его электрической сети и наличие тех или иных производственных дефектов.

В то же время авторами [18–20] критически анализируются результаты практического применения представленных в работах [21–29] методик, результатов исследований и подчеркивается необходимость совершенствования или разработки новой методики исследования оплавлений медных проводников, изымаемых с мест пожаров. Ввиду этого некоторые эксперты отказываются от применения отдельных методических указаний. Так, например, эксперты Воронежского регионального центра судебных экспертиз, выполняя повторную комплексную экспертизу, в Заключении эксперта № 9667/7-2; № 9668/3-2 от 21.02.2020 г. указали, что не могут исследовать два предоставленных в качестве объекта исследования шлифа медных проводников с оплавлениями, так как методика “не сертифицирована” Российским федеральным центром судебной экспертизы. Известны также случаи, когда по ряду причин утрачиваются оплавления медных проводников при сохранности остальной электрической цепи и формально решить вопрос о причине их образования в категоричной форме не представляется возможным.

Следует напомнить, что в электрической сети автотранспортных средств применяется постоянный

ток, который обладает специфическими свойствами. Например, специалисты компании Lapp GmbH пришли к выводу, что использование постоянного тока сопряжено с определенными трудностями, связанными с его контролем и управлением. В частности, они отмечают, что при переменном токе дуга гаснет сама, если коннектор отсоединен при нагрузке, а при постоянном токе она остается и может привести к значительным повреждениям. Поэтому специалисты компании Lapp GmbH для решения этой проблемы считают необходимым разработку специальных выключателей и штепсельных разъемов, обеспечивающих гашение дуги. Выводы специалистов этой компании подтверждаются практикой эксплуатации электромобилей и отзывной кампанией, проведенной в 2014 г. американским производителем Tesla Motors. В ходе этой акции было заменено 29 тыс. зарядных устройств для машин по причине дефекта, ведущего к перегреву, что может послужить причиной пожара.

Профессор Ф. Бергер из TU Ilmenau также обнаружил, что диэлектрическая прочность кабелей для постоянного тока (в отличие от кабелей переменного тока) зависит от температуры. На сегодняшний день это явление не изучено вообще. Особенности протекания электродуговых процессов в автомобильной электрической сети отмечаются в работах [12, 14].

Целью настоящей работы является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке или внешнему высокотемпературному воздействию. Под внешним высокотемпературным воздействием в настоящей работе понимается температура 850–950 °С, что соответствует среднеобъемной температуре во второй фазе пожара на легковом автомобиле.

Исходя из этого были поставлены следующие задачи исследования:

- показать, что процессы, происходящие в медном проводнике при токовой перегрузке и внешнем

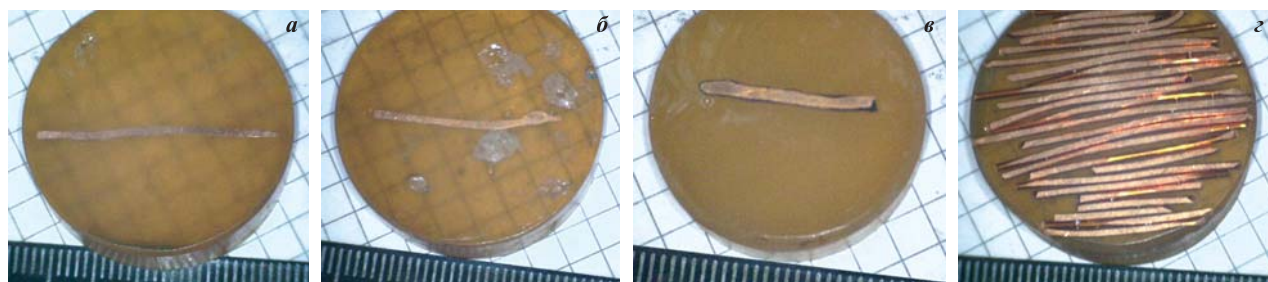


Рис. 1. Общий вид образцов исследования: *a* — высокотемпературный отжиг; *б* — токовая перегрузка с оплавлением; *в* — токовая перегрузка без оплавления; *г* — исходное состояние электротехнической проволоки

Fig. 1. General view of research samples: *a* — high temperature annealing; *b* — current overload with reflow; *v* — current overload without reflow; *g* — initial state of the electrical wire

тепловом воздействии, приводят к изменению его структуры;

- экспериментально доказать, что изменение структуры медного проводника при токовой перегрузке или внешнем высокотемпературном воздействии может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости;
- экспериментально подтвердить, что микротвердость медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине;
- подтвердить предположение, что микротвердость фрагмента медного проводника, подвергшегося протеканию сверхтока, является стабильной и не подвержена изменениям в естественных условиях хранения образцов (без умышленного внесения изменений).

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре опережающего развития “Veritas” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, а также на микротвердомере DuraScan 20. Для исследования были изготовлены аншлифы медных проволок.

В настоящей работе проводилось измерение микротвердости следующих образцов:

а) фрагмента провода массы автомобиля, загоревшегося на стоянке при поджоге (высокотемпературный отжиг) (рис. 1, *a*);

б) фрагмента медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и имеющего оплавление (рис. 1, *б*);

в) фрагмента медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и не имеющего оплавлений (рис. 1, *в*);

г) фрагмента электротехнической проволоки в исходном состоянии (рис. 1, *г*).

Все образцы заливались в эпоксидную смолу и подвергались шлифовке, при этом многопроволочные проводники разделялись на отдельные проводочки (см. рис. 1). Измерения выполнялись с соблюдением общих требований ГОСТ 9450–76 “Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников”.

Результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что метод измерения микротвердости является единственным методом, который позволяет определить твердость фаз и структурных составляющих металлов и многокомпонентных сплавов. В работах [30, 31] на основе экспериментов по отжигу кислородосодержащей меди в диапазоне температур 300–700 °С получены данные по изменению механических свойств металла, а также эволюция изменения текстуры в ходе волочения медной проволоки. Таким образом, доказано, что на разных этапах изготовления медная электротехническая проволока имеет различную текстуру и, соответственно, обладает разными механическими свойствами.

В работе [10] отмечается, что при перегрузке кратностью более 3–4 в многопроволочном проводнике наблюдалось расплавление отдельных участков проволок, при этом участки расплавления существенно отличались по структуре от нерасплавленных проволок. Причиной этого являлось окисление меди и, как следствие, образование доэвтектической, эвтектической или реже — заэвтектической структуры. Микроструктура нерасплавленных проволок, как правило, имела крупные зерна меди с двойниками отжига внутри, образовавшимися в результате нагрева при протекании тока перегрузки по проводнику [10].

Автором [10] показано, что протекание сверхтока по проводнику вызывает в пределах оплавления образование зерен меди различной формы и ориентировки к поверхности оплавления, в частности могут наблюдаться зерна дендритной, столбчатой и равноосной формы.

В работе [10] также доказано, что отжиг при температурах 800–900 °С в течение 20 и 40 мин не вызывает значительных изменений в форме дендритных зерен, наблюдается лишь укрупнение равноосных зерен меди с появлением двойников отжига внутри. Повышение температурного воздействия до 1000 °С сопровождается исчезновением дендритной структуры с нивелированием преимущественной ориентировки и значительным укрупнением равноосных зерен меди, по размерам сопоставимых с сечением проводника.

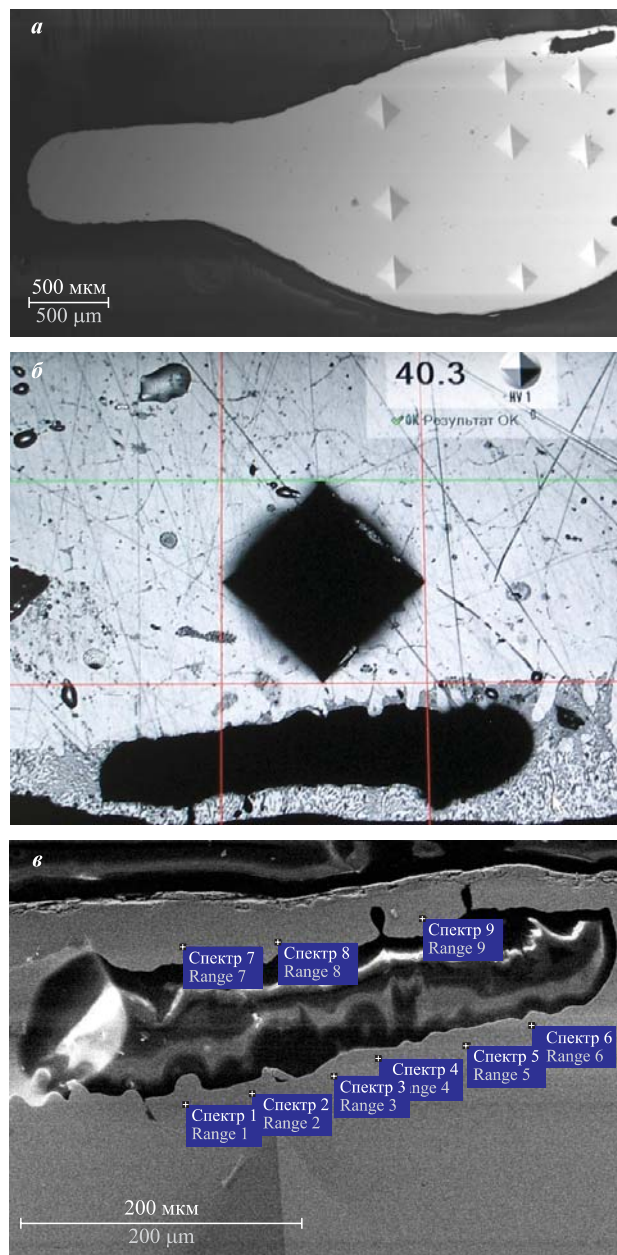


Рис. 2. Образец на рис. 1, б: а — общий вид, увеличение 35×; б — измерение микротвердости в области поры; в — точки микроанализа в области поры

Fig. 2. Sample on Fig. 1, b: a — general view, increase of 35×; b — measurement of microhardness in the pore area; v — microanalysis points in the pore area

Таким образом, течение сверхтока по медному проводнику вызывает образование различных структур, что хорошо согласуется с данными работы [14], в которой экспериментально доказано, что температура в случае токовой перегрузки распределяется по проводнику неравномерно. Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что именно многообразие структур, образующихся при протекании сверхтока по медному проводнику или его отжиге в диапазоне температур 300–700 °С, затрудняет применение действующей методики [18, 19].

Сечение фрагмента провода массы автомобиля, подвергнутого высокотемпературному отжигу, составляет 19,625 мм². Для измерения микротвердости выбирались проволоочки как с наружной стороны, так и из середины многопроволочного проводника. Микротвердость наружных проволоочек составила HV 61,7, внутренних — до HV 77,6. Исследованием образца, подвергнутого токовой перегрузке и имеющего оплавление (см. рис. 1, б), установлено, что он обладает пористостью, причем среди пор выделяется одна крупная пора, прилегающая к поверхностному слою (рис. 2). Схема измерения микротвердости показана на рис. 2, а.

Как следует из табл. 1, в точках измерения 7, 8 и 9, прилегающих к наружной поверхности проводника, отмечается повышенное содержание кислорода. Указанное обстоятельство соответствует выводам работы [10], в которой отмечается, что у проводника, подвергнутого токовой перегрузке, приповерхностный слой состоит из зерен дендритной формы при содержании кислорода порядка 0,2 %.

Как следует из рис. 2, б и рис. 3, а, микротвердость на внутреннем участке составляет HV 40,3–41,1, в то время как на участках оплавления с повышенным содержанием кислорода она достигает HV 51–58,4.

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 2, в

Table 1. The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 2, v

Точка измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. / Content of chemical element, % by mass	
	O	Cu
Спектр 1 / Range 1	1,81	98,19
Спектр 2 / Range 2	2,83	97,17
Спектр 3 / Range 3	1,65	98,35
Спектр 4 / Range 4	2,44	97,56
Спектр 5 / Range 5	1,84	98,16
Спектр 6 / Range 6	2,18	97,82
Спектр 7 / Range 7	6,26	93,74
Спектр 8 / Range 8	75,38	24,62
Спектр 9 / Range 9	34,53	65,47

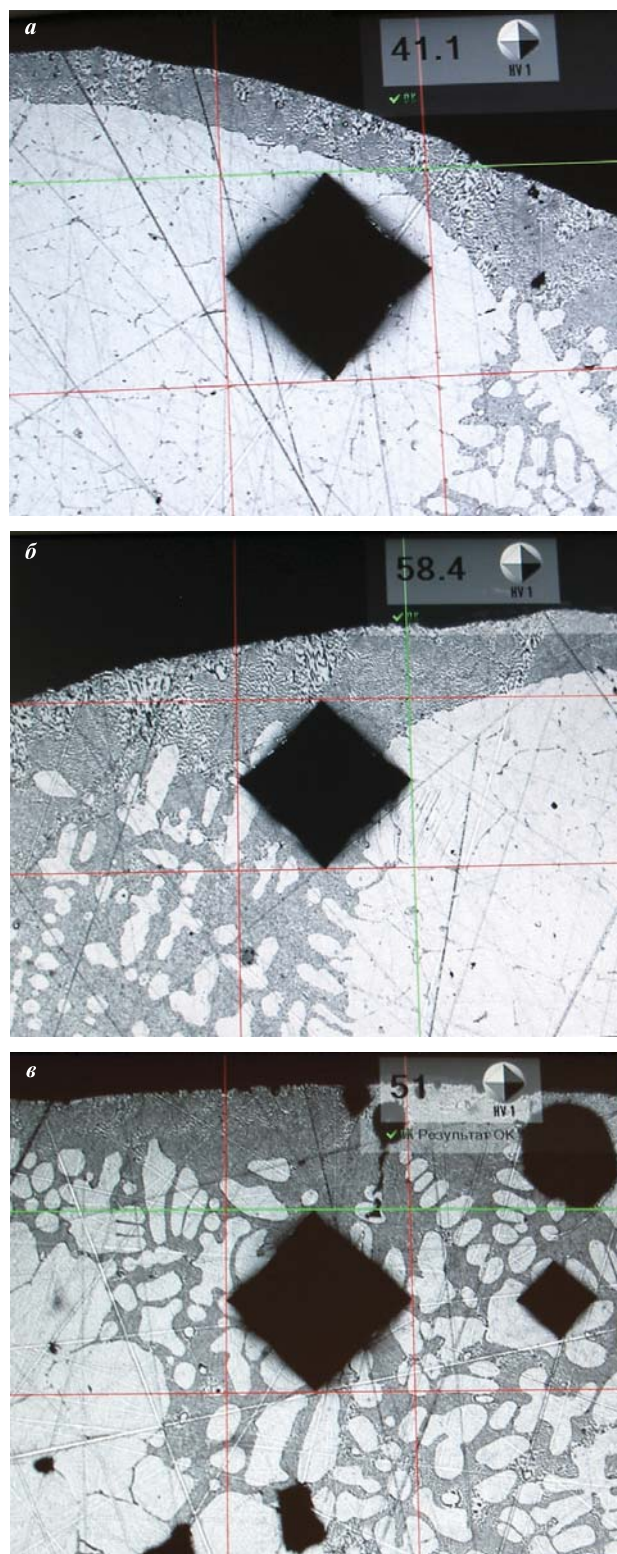


Рис. 3. Измерение микротвердости образца на рис. 1, *б*: *а* — внутренний участок; *б*, *в* — участки оплавления
Fig. 3. Measuring the microhardness of a sample on Fig. 1, *b*: *a* — inner section; *b*, *v* — areas of reflow

Исследованием образца, подвергнутого токовой перегрузке и не имеющего оплавлений (см. рис. 1, *в*), установлено, что он обладает пористостью в приповерхностном слое (см. рис. 4, *а*).

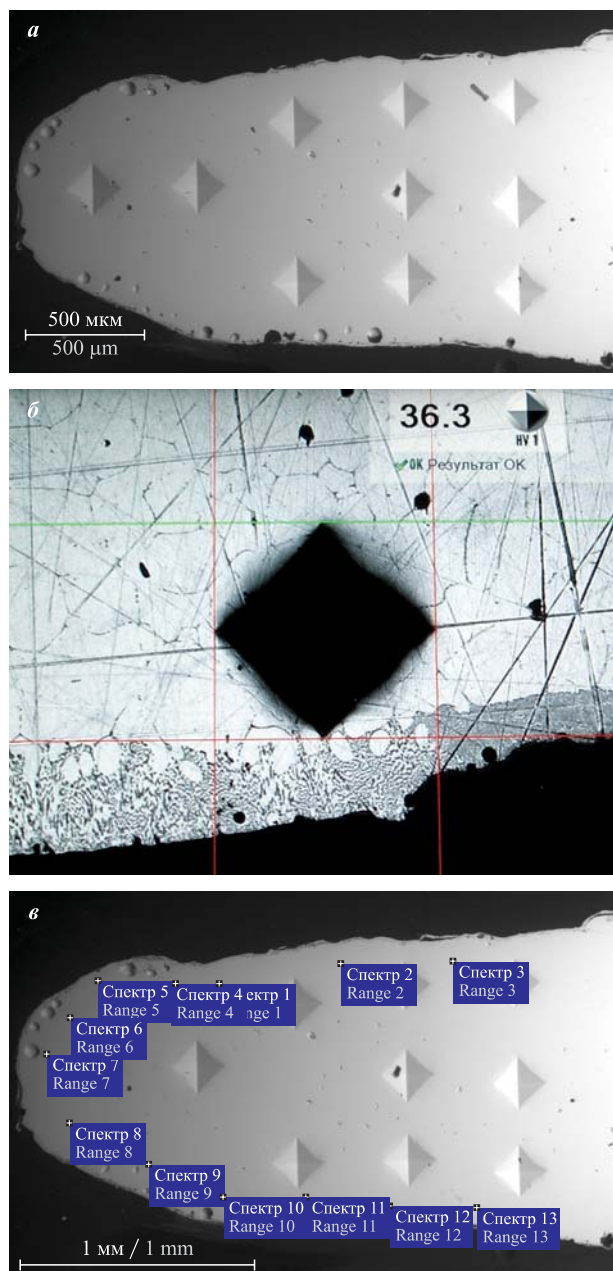


Рис. 4. Образец на рис. 1, *в*: *а* — общий вид, увеличение 50 $\times$; *б* — измерение микротвердости; *в* — точки микроанализа
Fig. 4. Sample on Fig. 1, *v*: *a* — general view, increase of 50 $\times$; *b* — measurement of microhardness; *v* — microanalysis points

Как следует из табл. 2, в точках измерения 4, 5, 6 и 7, прилегающих к наружной поверхности проводника, отмечается повышенное содержание кислорода. Указанное обстоятельство также соответствует выводам работы [10]: у проводника, подвергнутого токовой перегрузке, приповерхностный слой состоит из зерен дендритной формы при содержании кислорода порядка 0,2 %.

Как следует из рис. 4, *б*, микротвердость на внутреннем участке составляет HV 36,3. Таким образом, у проводников, подвергшихся токовой перегрузке, имеется характерная особенность: микро-

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 4,в
Table 2. The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 4,в

Точка измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. / Content of chemical element, % by mass	
	O	Cu
Спектр 1 / Range 1	1,05	98,95
Спектр 2 / Range 2	1,73	98,27
Спектр 3 / Range 3	1,67	98,33
Спектр 4 / Range 4	3,24	96,76
Спектр 5 / Range 5	2,72	97,28
Спектр 6 / Range 6	3,79	96,21
Спектр 7 / Range 7	2,74	97,26
Спектр 8 / Range 8	1,93	98,07
Спектр 9 / Range 9	1,32	98,68

твердость на внутренних участках существенно ниже, чем на оплавленных или приповерхностных участках.

Необходимо отметить, что микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, на участке, удаленном от места оплавления или фрагментации [10], составляет HV 56–58. Таким образом, микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине, что полностью соответствует данным [14].

Необходимо также подчеркнуть, что микротвердость проволок многопроволочного проводника, подвергнутого высокотемпературному внешнему воздействию, различается в зависимости от места расположения — снаружи или в центре проводника. Указанная особенность является характерным признаком высокотемпературного отжига, поскольку при токовой перегрузке все проволочки многопроволочного проводника без оплавлений имеют близкую по величине микротвердость. Микроструктура проволок соответствует данным [30, 31].

Измерением микротвердости фрагмента электротехнической проволоки в исходном состоянии (см. рис. 1,з) установлено, что она находится в диапазоне HV 73,8–78,2.

Исследованные образцы подверглись повторно измерению микротвердости после 2 мес. хранения при комнатной температуре. Полученные результаты в пределах погрешности измерений соответствовали первичным.

Таким образом, при исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых с мест пожаров, в качестве основного метода исследования можно

применять растровую микроскопию, а в качестве вспомогательного — метод измерения микротвердости, поскольку, во-первых, видна микроструктура, а во-вторых, определяются показатели, численно характеризующие протекающий процесс.

В ходе дальнейшего исследования возможно создание справочных таблиц, показывающих зависимость микротвердости от конкретных режимов токовой перегрузки или внешнего высокотемпературного воздействия.

Выводы

Показано, что процессы, происходящие в медном проводнике при токовой перегрузке и внешнем тепловом воздействии, приводят к изменению его структуры.

Экспериментально доказано, что изменение структуры медного проводника при токовой перегрузке или внешнем высокотемпературном воздействии может быть зафиксировано методом измерения микротвердости.

Установлено, что у медных проводников, подвергшихся токовой перегрузке, микротвердость на внутренних участках существенно ниже, чем на оплавленных или приповерхностных участках.

Экспериментально показано, что микротвердость медных проводников, подвергшихся высокотемпературному внешнему воздействию, больше, чем у проводников, подвергшихся токовой перегрузке.

Экспериментально подтверждено, что микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине.

Показано также, что метод измерения микротвердости можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии.

Настоящим исследованием подтверждено, что микротвердость фрагмента медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока или внешнему высокотемпературному воздействию, является стабильной и не подвержена изменениям в естественных условиях хранения образцов (без умышленного внесения изменений).

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и в конечном счете причины пожара автомобиля. Знание технической причины пожара даст возможность разрабатывать профилактические мероприятия и технические решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н. Н., Соколов С. В.* Какова “стоимость” пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88.
2. *Quintiere J. G.* Fundamentals of fire phenomena. — England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd., 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. *Beyler C., Carpenter D., Dinunno P.* Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. *Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J.* Automotive collision fires // SAE Technical Paper 741180, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. *Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki.* Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, No. 3. — P. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. *Чешко И. Д., Скودтаев С. В., Теплякова Т. Д.* Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2019. — № 1(49). — С. 107–115.
7. *Богатищев А. И.* Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2002. — 269 с.
8. *Чешко И. Д.* Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). — 2-е изд., стереотип. — СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. — 562 с.
9. *Чешко И. Д., Мокряк А. Ю., Скودтаев С. В.* Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2015. — № 1. — С. 41–46.
10. *Мокряк А. Ю.* Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2018. — 140 с.
11. *Смелков Г. И., Чешко И. Д., Плотников В. Г.* Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2017. — № 3. — С. 121–128.
12. *Недобитков А. И.* Особенности короткого замыкания в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 5. — С. 34–49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49.
13. *Смелков Г. И.* Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
14. *Недобитков А. И.* Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 42–50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.
15. *Колчин В. В., Крутолапов А. С.* Пожарная безопасность электромобилей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2018. — Т. 1, № 9. — С. 417–419.
16. *Lazarenko O., Loik V., Shtain B., Riegert D.* Research on the fire hazards of cells in electric car batteries // BITP. — 2018. — Vol. 52, No. 4. — P. 108–117. DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7.
17. *Larsson F., Andersson P., Mellander B.-E.* Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests // Batteries. — 2016. — Vol. 2, No. 2. — 13 p. DOI: 10.3390/batteries2020009.
18. *Чешко И. Д., Мокряк А. Ю., Мокряк А. В.* Эволюция методики определения первичности-вторичности оплавлений медных проводников, вызванных коротким замыканием // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2018. — № 3. — С. 39–45. DOI: 10.24411/2218-130X-2018-00047.
19. *Таубкин И. С., Саклантний А. Р.* О методических материалах по установлению причинно-следственной связи между аварийными режимами в электропроводке с медными проводниками и возникновением пожара // Теория и практика судебной экспертизы. — 2018. — Т. 13, № 3. — С. 38–46. DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46.
20. *Roby R. J., McAllister J.* Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire // Final Technical Report for Award No. 239052. — Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
21. *Babrauskas V.* Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? // Journal of Fire Protection Engineering. — 2004. — Vol. 14, No. 2. — P. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
22. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. — 1983. — Vol. 19, No. 3. — P. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.

23. Wright S. A., Loud J. D., Blanchard R. A. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? // *Fire Technology*. — 2015. — Vol. 51, No. 5. — P. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
24. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // *Fire Technology*. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
25. Hoffmann D. J., Swonder E. M., Burr M. T. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test // *Fire Technology*. — 2016. — Vol. 52, Issue 6. — P. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
26. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads // *Journal of Nanomaterials*. — 2015. — Article ID 373861. — 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
27. Lewis K. H., Templeton B. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating // *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. — Sarasota : National Association of Fire Investigators, 2008. — P. 183–195.
28. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation // *Fire & Materials* '2009. — London : Interscience Communications Ltd., 2009. — P. 857–869.
29. Carey N. J. Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. Diss. — Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
30. Loginov Yu. N., Demakov S. L., Ivanova M. A., Illarionov A. G., Karabanalov M. S., Stepatov S. I. Effect of annealing on properties of hot-rolled electrical copper // *The Physics of Metals and Metallography*. — 2015. — Vol. 116, No. 4. — P. 393–400. DOI: 10.1134/S0031918X1502009X.
31. Demakov S. L., Loginov Yu. N., Illarionov A. G., Ivanova M. A., Karabanalov M. S. Effect of annealing temperature on the texture of copper wire // *The Physics of Metals and Metallography*. — 2012. — Vol. 113, No. 7. — P. 681–686. DOI: 10.1134/S0031918X12070046.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 79–88 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88.
2. J. G. Quintiere. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. C. Beyler, D. Carpenter, P. Dinunno. *Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. D. Severy, D. Blaisdell, J. Kerkhoff. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper 741180*, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiko Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, no. 3, pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. I. D. Cheshko, S. V. Skodtaye, T. D. Teplyakova. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2019, no. 1(49), pp. 107–115 (in Russian).
7. A. I. Bogatishchev. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2002. 269 p. (in Russian).
8. I. D. Cheshko. *Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Examination of fire (objects, methods, methods of research)]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation Publ., 1997. 562 p. (in Russian).
9. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, S. V. Skodtaye. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).
10. A. Yu. Mokryak. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2018. 140 p. (in Russian).
11. G. I. Smelkov, I. D. Cheshko, V. G. Plotnikov. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 3, pp. 121–128 (in Russian).
12. A. I. Nedobitkov. Specific features of short circuit in automobile electrical system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 34–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49.

13. G. I. Smelkov. *Pozharnaya bezopasnost elektroprovodok* [Fire safety of wirings]. Moscow, Cable LLC Publ., 2009. 328 p. (in Russian).
14. A. I. Nedobitkov. Peculiarities of current overload in the car electric network. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 42–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.
15. V. V. Kolchin, A. S. Krutolapov. Fire safety of electric vehicles. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2018, vol. 1, no. 9, pp. 417–419 (in Russian).
16. O. Lazarenko, V. Loik, B. Shtain, D. Riegert. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries. *BiTP*, 2018, vol. 52, no. 4, pp. 108–117. DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7.
17. F. Larsson, P. Andersson, B.-E. Mellander. Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2016, vol. 2, no. 2, 13 p. DOI: 10.3390/batteries2020009.
18. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, A. V. Mokryak. Evolution of the methodology of distinguishing “victim” from “cause” beads of copper conductors by short circuit. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2018, no. 3, pp. 39–45 (in Russian). DOI: 10.24411/2218-130x-2018-00047.
19. I. S. Taubkin, A. R. Saklantiy. Methodological resources for investigating the failure status of electrical wiring with copper conductors as the cause of fire. *Teoriya i praktika sudebnoy ekspertizy / Theory and Practice of Forensic Science*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 38–46 (in Russian). DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46.
20. R. J. Roby, J. McAllister. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. In: *Final Technical Report for Award No. 239052*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
21. V. Babrauskas. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, vol. 14, no. 2, pp. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
22. M. Delplace, E. Vos. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*, 1983, vol. 19, no. 3, pp. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.
23. S. A. Wright, J. D. Loud, R. A. Blanchard. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? *Fire Technology*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
24. V. Babrauskas. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 3, pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
25. D. J. Hoffmann, E. M. Swonder, M. T. Burr. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, issue 6, pp. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
26. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads. *Journal of Nanomaterials*, 2015, article ID 373861. 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
27. K. H. Lewis, B. Templeton. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008, pp. 183–195.
28. I. Murray, F. Ajersch. New metallurgical techniques applied to fire investigation. In: *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009, pp. 857–869.
29. N. J. Carey. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping*. Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
30. Yu. N. Loginov, S. L. Demakov, M. A. Ivanova, A. G. Illarionov, M. S. Karabanalov, S. I. Stepatov. Effect of annealing on properties of hot-rolled electrical copper. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 4, pp. 393–400. DOI: 10.1134/S0031918X1502009X.
31. S. L. Demakov, Yu. N. Loginov, A. G. Illarionov, M. A. Ivanova, M. S. Karabanalov. Effect of annealing temperature on the texture of copper wire. *The Physics of Metals and Metallography*, 2012, vol. 113, no. 7, pp. 681–686. DOI: 10.1134/S0031918X12070046.

Поступила 06.03.2020, после доработки 27.03.2020;
принята к публикации 05.04.2020

Received March 6, 2020; Received in revised form March 27, 2020;
Accepted April 5, 2020

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара

© А. Г. Тамразян¹, Ю. Н. Звонов^{2✉}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

² ООО «ПИК-Проект» (Россия, 123022, г. Москва, ул. Красная Пресня, 24)

РЕЗЮМЕ

Введение. Отмечена актуальность понимания механизмов формирования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в условиях пожара. Выявлена необходимость учета расчетной ситуации, при которой аварийное высокотемпературное воздействие прикладывается по верхней грани железобетонной плиты. Обозначена связь работоспособности железобетонного сечения, обогреваемого по верхней грани, с изменением полезной нагрузки в процессе развития пожара вследствие ее выгорания. Целью работы является получение расчетной методики, позволяющей оценить зависимость отказа конструкции от изменяющейся полезной нагрузки и определить резервы несущей способности сечения конструкции.

Теоретические положения исследования. Приведен аналитический вывод зависимости силовой нагрузки от времени развития пожара, его температуры, а также нижней рабочей теплоты сгорания помещений. Вывод аналитической зависимости выполнен через эквивалент сгорания массы древесины к силовой нагрузке.

Результаты и их обсуждение. На основании предложенных зависимостей проведены численные расчеты для административного здания. Приведены графики зависимости уменьшения нагрузки от времени пожара и его температуры. Расчетами установлено, что в административных зданиях через 60 мин с момента начала пожара силовая нагрузка на несущие конструкции уменьшается не менее чем на 420 Н/м². С учетом полученных зависимостей установлено, что резервы несущей способности железобетонных плит перекрытий достигают не менее 79 мин при учете убывания нагрузки, изменяющейся во времени, по сравнению с постоянной нагрузкой.

Заключение. Сделан вывод о том, что при моделировании высокотемпературного нагружения по верхней грани железобетонных плит перекрытий целесообразно учитывать уменьшение нагрузки вследствие ее выгорания. Это позволит учитывать дополнительные резервы несущей способности железобетонных плит при пожаре.

Ключевые слова: огнестойкость железобетонных плит; стандартный температурный режим пожара; изменение полезной нагрузки; пожарная нагрузка; силовая нагрузка; скорость изменения изгибающих моментов; теплотехническая задача; изотерма пятьсот градусов; запасы прочности железобетонного сечения.

Для цитирования: Тамразян А. Г., Звонов Ю. Н. К оценке резервов несущей способности железобетонных плит в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 26–33. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.26-33.

✉ Звонов Юрий Николаевич, e-mail: zvonovyn@mail.ru

To the estimation of emergency bearing capacity of reinforced slabs in the case of fire

© Ashot G. Tamrazyan¹, Yuriy N. Zvonov^{2✉}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

² ООО «ПИК-Проект» (Krasnaya Presnya St., 24, Moscow, 123022, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The relevance of understanding the mechanisms of formation of the stress-strain state of reinforced concrete structures in fire conditions is noted. The need to take into account the design situation in which an emergency high-temperature effect is applied along the upper face of a reinforced concrete slab is highlighted. The connection between the performance of a reinforced concrete section heated along the upper face and the change in the payload during the development of a fire due to its burnout is indicated. The aim of the work is to obtain a calculation methodology that allows us to assess the dependence of structural failure on a changing payload and determine the reserves of the bearing capacity of the structural section.

Theoretical theses of research. There is given the analytical conclusion about the dependence of the forced loading value on the fire timing, its temperature and the lowest working combustion heat value within building. The conclusion about the analytical dependence is carried out using the equivalent of wood-pulp combustion to the forced loading.

Results and discussion. On the basis of the presented dependences there numerous calculations for an administrative building were carried out. Graphs showing the dependence of forced loading decrease on fire timing and its temperature are given. The calculation showed that in administrative buildings in 60 minutes after the fire starts the forced loading decrease on the bearing structures reaches not less than 420 H/m². Taking into account the above dependences, it was determined that the emergency bearing capacity of reinforced slabs is reached in 79 minutes considering the forced loading decrease changing in time compared with the constant load.

Conclusion. There was drawn a conclusion that while modeling a high temperature loading on the upper boarder of reinforced slab floors and coverings, it's advisable to consider the decrease of forced loading because of its destruction by fire. It will allow to include additional reserves of load bearing capacity of reinforced slabs in case of fire.

Keywords: fire resistance of reinforced concrete slabs; standard temperature regime of fire; change in payload; fire load; forced loading; rate of change of bending moments; heat engineering problem; isotherm five hundred degrees; safety margins of reinforced concrete section.

For citation: A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. To the estimation of emergency bearing capacity of reinforced slabs in the case of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 26–33 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.26-33.

✉ Yuriy Nikolaevich Zvonov, e-mail: zvonovyn@mail.ru

Введение

Анализ и прогнозирование формирования напряженно-деформированного состояния железобетонного сечения под действием высоких температур в процессе пожара позволят обеспечить безаварийную работу конструкций зданий и сооружений при наиболее эффективном использовании работы сечения и наименьшей материалоемкости. Важным фактором, вносящим существенный вклад в фактическую работу конструкции, является полезная нагрузка, обуславливающая величины нагрузочных эффектов (изгибающих моментов, поперечных сил).

В основе действующих нормативных документов (ГОСТ 30247.1–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции”; СТО 36554501-006–2006 “Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций”; СП 329.1325800.2017 “Здания и сооружения. Правила обследования после пожара”), а также проведенных исследований [1–9] лежит гипотеза приложения и воздействия высокой температуры пожара на нижнюю грань конструкции плит перекрытий и покрытий. Возможность высокотемпературного обогрева верхней поверхности плит перекрытий и покрытий не рассматривается. Однако вероятность подобного воздействия в условиях пожара, несмотря на наличие отделочных слоев, которые нередко не являются огнеупорными, высока (как показывают технические отчеты* по обследованию конст-

рукций после пожара), что зачастую может приводить к критическим последствиям.

Высокотемпературное воздействие пожара на верхнюю грань плиты перекрытия особенно актуально для монолитных железобетонных зданий и сооружений с каркасной конструктивной системой [10–12]. Наличие жестких узлов сопряжений элементов каркаса обуславливает большие опорные моменты и рабочее армирование по верхней грани железобетонных плит перекрытий. Немаловажным фактором, влияющим на обеспечение безопасности зданий и сооружений с монолитным железобетонным каркасом и плоскими безбалочными плитами перекрытий, является продавливание, т. е. работа плит на действии поперечной силы и изгибающего момента [13, 14].

Вопрос высокотемпературных воздействий на верхнюю грань железобетонных плит также актуален при рассмотрении работы статически определимых конструкций. Наступление предельного состояния по несущей способности плит перекрытий из железобетона происходит вследствие нагрева сжатой зоны бетона сечения [15].

Однако, как показывает анализ последствий реальных пожаров, при моделировании нагружения высокотемпературным воздействием верхней грани конструкции в расчетах несущей способности целесообразно учитывать возможность уменьшения силовой нагрузки в ходе развития пожара, что позволяет более достоверно прогнозировать ресурсы работы конструкции в условиях аварийной ситуации.

Целью настоящей работы является вывод аналитического решения, описывающего алгоритмы изменения силовой нагрузки в ходе пожара, анализ и оценка вклада изменяющейся полезной нагрузки в резервы несущей способности железобетонных плит при обогреве верхней грани.

Теоретические положения исследования

Уменьшение силовой нагрузки напрямую связано с пожарной нагрузкой. Пожарная нагрузка в по-

* Технический отчет “Результаты визуального, инструментального обследования и поверочных расчетов железобетонных конструкций, поврежденных пожаром, многофункционального гостиничного комплекса, по адресу: г. Москва, ул. Новокосинская, вл. 18”, выполненный ООО “Топгеомониторинг” в 2015 г.; Технический отчет “Результаты обследования и конструктивных расчетов железобетонных конструкций после пожара объекта: “Многоэтажный жилой дом с встроенными и пристроенными нежилыми помещениями общественного назначения. Корпус 7”, по адресу: г. Москва, проезд Высоковольный, вл. 21, выполненный ООО “НИИПТЭС” в 2019 г.

мещениях зданий и сооружений складывается из постоянной (материалы, из которых состоят строительные конструкции, — горючие и труднотгорючие; конструкция полов, кровель, подвесных потолков и т. п.), и временной длительной (стационарное оборудование, сырье, готовая продукция, мебель и т. п.).

Известно [15–18], что удельной приведенной пожарной нагрузкой (т. е. нагрузкой, отнесенной к площади пола помещения) называют нагрузку, исчисляемую в эквиваленте сгорания веса древесины g_0 (Н/м²):

$$g_0 = \frac{M}{F} \frac{\sum m_i Q_{ni}^p}{Q_{нд}^p}, \quad (1)$$

где M — вес сгораемой части силовой нагрузки, Н;
 F — площадь помещения, м²;

m_i — относительная массовая доля i -го материала в составе пожарной нагрузки, доли ед.;

Q_{ni}^p — теплота сгорания i -го материала в составе пожарной нагрузки, Дж/кг;

$Q_{нд}^p$ — теплота сгорания древесины, Дж/кг.

Тогда часть силовой нагрузки $q_{гор}$, которая слагает пожарную нагрузку и выгорает в процессе пожара, будет определяться выражением

$$q_{гор} = \frac{M}{F} = g_0 \frac{Q_{нд}^p}{\sum m_i Q_{ni}^p}, \quad (2)$$

где $q_{гор}$ — сгораемая и трудносгораемая часть силовой нагрузки, Н/м².

Низшая рабочая теплота сгорания помещения $Q_{н.пом}^p$ (Дж/кг) определяется долями масс материалов, а также рабочей теплотой сгорания каждого из них:

$$Q_{н.пом}^p = \sum m_i Q_{ni}^p. \quad (3)$$

Учитывая (2) и (3), получим:

$$q_{гор} = g_0 (Q_{нд}^p / Q_{н.пом}^p). \quad (4)$$

Величина выгоревшей удельной приведенной пожарной нагрузки Δg_0 (Н/м²) в любой момент времени t зависит от скорости сгорания древесины $\vartheta_{гор.д}$ (Н/(м²·с)) и определяется по формуле

$$\Delta g_0 = \vartheta_{гор.д} t, \quad (5)$$

где t — время с момента начала пожара, с.

Учитывая формулы (4) и (5), получим выражение для сгоревшей части силовой нагрузки $\Delta q_{гор}$ (Н/м²), слагающей пожарную нагрузку, в любой момент времени t :

$$\Delta q_{гор} = \vartheta_{гор.д} t \frac{Q_{нд}^p}{Q_{н.пом}^p}. \quad (6)$$

Поскольку режим пожара стандартный, температура пожара описывается следующей зависимо-

стью от времени t (на основании ГОСТ 30247.0–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования”):

$$T = 345 \cdot \lg \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) + T_0, \quad (7)$$

где T — температура пожара в момент времени t , °С;
 T_0 — температура среды в помещении до начала пожара, °С.

Тогда время пожара как функция от температуры

$$t = 7,5 (10^{0,0029(T-T_0)} - 1). \quad (8)$$

Учитывая уравнения (6) и (8), получим:

$$\Delta q_{гор} = 7,5 (10^{0,0029(T-T_0)} - 1) \vartheta_{гор.д} \frac{Q_{нд}^p}{Q_{н.пом}^p}. \quad (9)$$

Выполним проверку полученной формулы по размерностям:

$$\left[\text{с} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{Дж}} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right], \quad (10)$$

что соответствует размерности нагрузки.

Так как скорость сгорания древесины $\vartheta_{гор.д}$ и низшая рабочая теплота сгорания древесины $Q_{нд}^p$ известны (в рамках граничных условий нашей задачи их можно принять за константы [19, 20]), получим:

$$\Delta q_{гор} = 1,42 \cdot 10^7 \frac{10^{0,0029(T-T_0)} - 1}{Q_{н.пом}^p}. \quad (11)$$

Результаты и их обсуждение

На основании формулы (11) выполним расчет изменения нагрузки при пожаре в административном здании. Низшая рабочая теплота сгорания $Q_{н.адм.зд}^p = 14,0$ МДж/кг (данные взяты из [19, 20]). Результаты расчета представим в графическом виде: зависимость изменения силовой нагрузки от температуры пожара — на рис. 1, зависимость изменения силовой нагрузки от времени пожара — на рис. 2.

Таким образом, можно прогнозировать существенное снижение силовой нагрузки уже через 60 мин с момента начала огневого воздействия (не менее чем на 420 Н/м²).

Для наглядной иллюстрации выполним расчет статически определимой плиты перекрытия, работающей по балочной схеме (опирание по двум сторонам). Разрушение плиты перекрытия произойдет в результате прогрева бетона сжатой зоны с последующим снижением его прочности, уменьшением рабочей высоты сечения и разрушением плиты по растянутой арматуре.

Исходные данные для расчета: высота плиты перекрытия $h = 160$ мм, ее ширина $b = 1000$ мм, пролет плиты $l = 4000$ мм; бетон тяжелый класса В25;

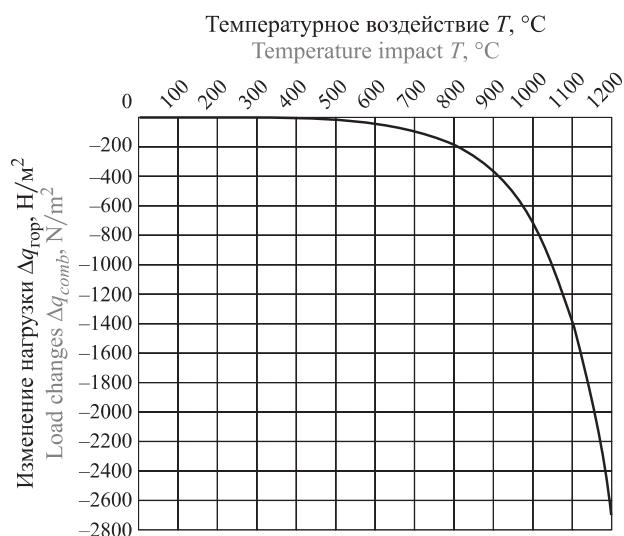


Рис. 1. Зависимость изменения силовой нагрузки от температуры пожара

Fig. 1. The dependence of forced loading changes on temperature of fire

нормативная призмная прочность бетона $R_{bn} = 18,5$ МПа; арматура класса А500, армирование $A_s = 2,51$ см², нормативное сопротивление арматуры растяжению $R_{sn} = 500$ МПа; толщина защитного слоя бетона 15 мм; нормативная постоянная и длительная нагрузка 6400 Н/м²; сгораемая часть нагрузки 2400 Н/м².

Соотнесем изменение нагрузки с начальным значением сгораемой части нагрузки для нашей задачи и выразим его в процентах (табл. 1).

Как видно из табл. 1, 100 % сгораемой части нагрузки выгорит не ранее чем через 300 мин с момента огневого воздействия.

Изгибающий момент от действия внешних сил в плите перекрытия M (Н·м) без учета выгорания нагрузки составляет:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{6400 \cdot 4,0^2}{8} = 12800 \text{ Н·м.} \quad (12)$$

Таблица 1. Уменьшение сгораемой части нагрузки

Table 1. Decrease of forced loading (in per cents) from the initial value

Время пожара t , мин Fire time t , min	Температура пожара T , °C Fire temperature T , °C	Уменьшение нагрузки $\Delta q_{гор}$, % Decrease of forced loading Δq_{comb} , %
30	821	11
45	875	14
60	925	18
90	986	29
120	1029	41
150	1060	48
180	1090	57
240	1133	80
300	1184	100

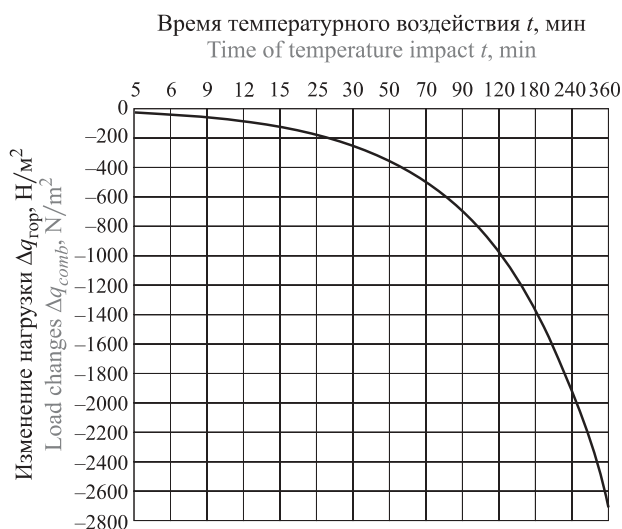


Рис. 2. Зависимость изменения силовой нагрузки от времени пожара

Fig. 2. The dependence of forced loading changes on fire timing

Изгибающий момент от действия внешних сил в плите перекрытия с учетом выгорания нагрузки не является константой и вычисляется по формуле

$$M = \frac{1}{8} \left(q - 1,42 \cdot 10^7 \frac{10^{0,0029(T-T_0)} - 1}{Q_{н.пом}^p} \right) l^2. \quad (13)$$

Выполним теплотехнический расчет методом конечных элементов с использованием препроцессора — программного комплекса “Salome”, решателя — математического пакета “Elmer FEM solver” и постпроцессора — программного комплекса “Para View”. Результаты расчета прогрева бетона сечения плиты приведены на рис. 3.

По результатам расчета получены изотермы прогрева сжатой зоны бетона сечения во времени (рис. 4).

Расчет прочности железобетонного сечения изгибаемой плиты выполним по методу “Изотермы 500 °C”. Бетон, прогретый до 500 °C, выключаем

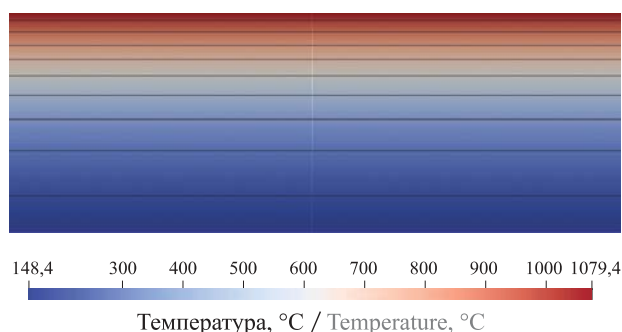


Рис. 3. Изотермы в сечении плиты при одностороннем обогреве верхней части сечения через 180 мин воздействия стандартного температурного режима пожара

Fig. 3. Isotherms in the cross section of the stove with one-sided heating along the upper part of the cross section after 180 minutes of the standard temperature of the fire

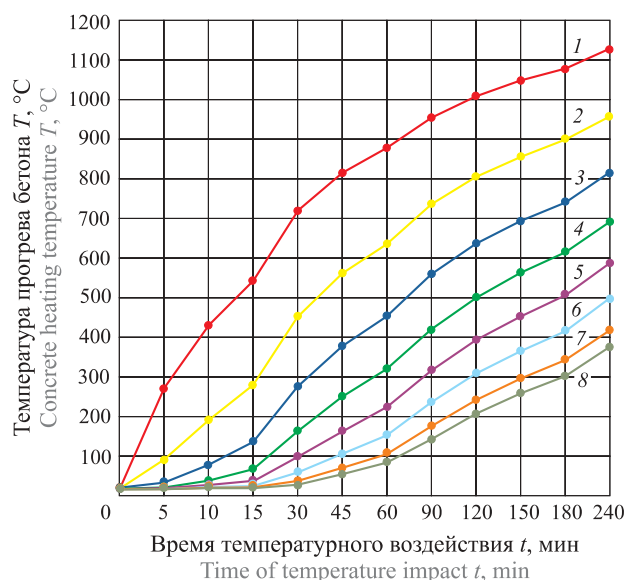


Рис. 4. Изотермы прогрева сжатой зоны бетона сечения плиты на глубине 0 мм (1), 0,015 мм (2), 0,030 мм (3), 0,045 мм (4), 0,060 мм (5), 0,075 мм (6), 0,090 мм (7) и 0,100 мм (8)

Fig. 4. Isotherms of heating the compressed zone of the concrete section of the slab at the depth 0 mm (1), 0.015 mm (2), 0.030 mm (3), 0.045 mm (4), 0.060 mm (5), 0.075 mm (6), 0.090 mm (7) and 0.100 mm (8)

из работы сечения. Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Из графиков на рис. 5 видно, что резерв несущей способности R (закрашенная красным цветом область) составляет не менее 79 мин.

Используя метод наименьших квадратов, получим аналитическое решение для прочности сечения рассматриваемой плиты в зависимости от времени:

$$M_1 = R_b b x [(0,1 \cdot 10^{-9} t^2 - 0,6 \cdot 10^{-5} t + 0,145) - 0,5x]. \quad (14)$$

Выполним оценку вклада в изменение напряженно-деформированного состояния сечения плиты функции уменьшения нагрузки и функции снижения несущей способности. Для этого определим скорость изменения данных функций в зависимости от времени, т. е. вычислим производные функций:

$$\frac{dM_1}{dt} = 0,22 \cdot 10^{-4} t - 0,645 \text{ (Н·м/с)}; \quad (15)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = -0,27 \text{ (Н·м/с)}. \quad (16)$$

Построим графики полученных функций (рис. 6).

Таким образом, из графиков рис. 6 видно, что каждую минуту нагрузка убывает на величину от 0,13 % от начального значения (в начале высокотемпературного воздействия) до 0,19 % от начального значения (через 240 мин с момента начала высокотемпературного воздействия), а несущая способность

Таблица 2. Значения изгибающего момента с учетом выгорания нагрузки при высоте сжатой зоны бетона $x = 5,81$ мм
Table 2. Values of bending moment considering forced loading destroyed by fire at the height of compressed concrete zone $x = 5.81$ mm

Время t , мин / Time t , min	Глубина прогрева до критической температуры a_p , мм / Depth of warming up to critical temperature a_p , mm	Рабочая высота сечения при нагреве h_{0r} , мм / Working height section during heating h_{0r} , mm	$\xi_R h_{0r}$, мм / $\xi_R h_{0r}$, mm	Изгибающий момент, Н·м / Bending moment, N·m	
				воспринимаемый сечением M_1 / Taken by section M_1	от действия нагрузки M_2 / Under acting load M_2
0	0	145	71,5	15275	12800
30	10	135	66,5	14200	12284
45	15	130	64,1	13663	12079
60	20	125	61,6	13125	11948
69	23	122	60,2	12800	11792
90	30	115	56,7	12050	11392
120	35	110	54,2	11513	10833
148	44	101	49,8	10501	10501
150	45	100	49,3	10438	10476
180	50	95	46,8	9900	10053
240	65	80	39,4	8288	8963

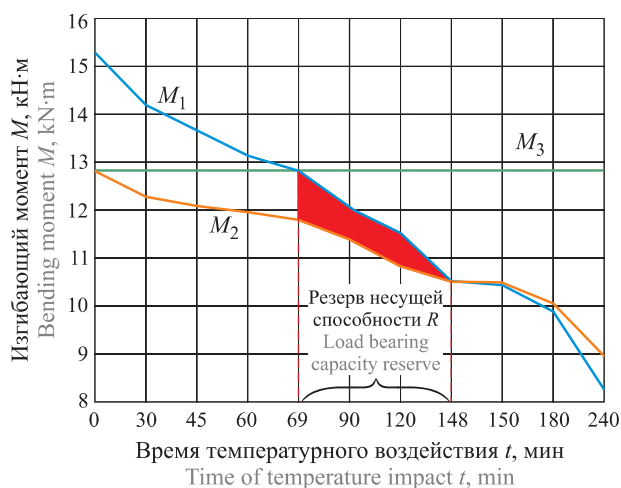


Рис. 5. Зависимость изгибающих моментов, воспринимаемого сечением M_1 ; возникающего с учетом уменьшения нагрузки M_2 ; возникающего от постоянной нагрузки M_3 , от времени

Fig. 5. The dependence of bending moments on time, perceived by the cross-section M_1 ; arising taking into account the reduction of the load M_2 ; arising from the constant load M_3

понижается более равномерно — на 0,25–0,26 % от начального значения в течение всего времени воздействия.

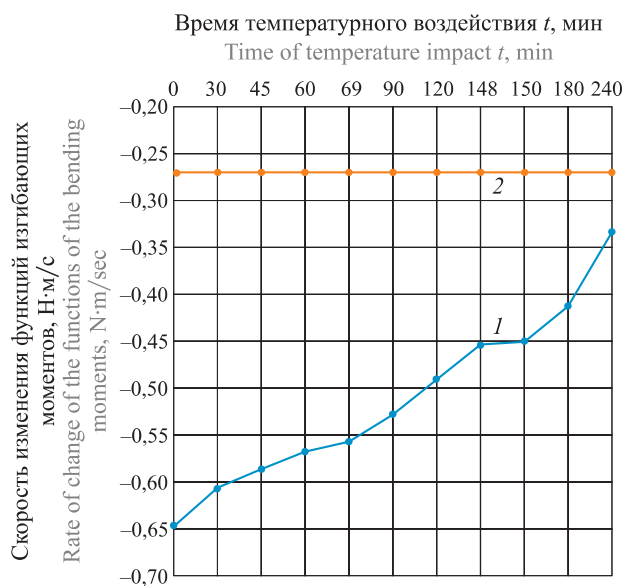


Рис. 6. Скорости изменения функций изгибающих моментов во времени: 1 — несущей способности сечения плиты; 2 — нагрузки

Fig. 6. The rate of change of the functions of bending moments in time: 1 — the bearing capacity of the slice of the plate from time to time; 2 — load

Заключение

Современная нормативная база не учитывает возможностей высокотемпературного воздействия на верхнюю грань железобетонных плит перекрытий и покрытий. В условиях пожара происходит нагрев верхней части плит перекрытий и покрытий, вследствие чего в конструкциях возникают непроектные схемы разрушения.

В настоящей работе авторы рассмотрели возможность учета изменения силовой нагрузки в связи с ее выгоранием в ходе пожара. В статье предложены аналитические зависимости, позволяющие учитывать фактическую силовую нагрузку, изменяющуюся в ходе пожара, при расчетах плит покрытий и перекрытий на огнестойкость. Проведено расчетное исследование и обоснованы резервы несущей способности изгибаемых элементов, которые не учитываются на данный момент.

Применение предложенной методики позволит наиболее достоверно оценивать и прогнозировать резервы несущей способности железобетонных плит перекрытий и покрытий при высокотемпературном воздействии в условиях пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 8. — P. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. Kordina K. Brände in unterirdischen verkehrsanlagen // Bautechnik. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. Korolchenko D., Tusnin A., Trushina S., Korolchenko A. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings // International Journal of Applied Engineering Research. — 2015. — Vol. 10, No. 21. — P. 42541–42548.
4. Law M. A review of formulae for T-equivalent // Fire Safety Science. — 1997. — Vol. 5. — P. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
5. Lees' loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control / Mannan S. (ed.). — 3rd ed. — Texas, USA : Elsevier, Inc., 2005. — Vol. 1. — 3708 p. DOI: 10.1016/b978-0-7506-7555-0.x5081-6.
6. 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. — P. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
7. Werther N. Brandversuche an tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-nordtunnel in Madrid // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 9. — P. 729–731. (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
8. Жуков В. В., Молчадский И. С., Лавров В. Н. Расчет пределов огнестойкости безбалочных перекрытий // Пожарная безопасность. — 2006. — № 1. — С. 36–41.
9. Мехрализадех А. Конструктивная безопасность монолитных высотных зданий с переходными этажами при аварийных воздействиях : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2014. — 202 с.
10. Tamrazyan A. G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 365. — Article Number 052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021.
11. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Экспериментальные и аналитические исследования огнестойкости сплошной бетонной плиты со стальной и композитной арматурой // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 44–51.
12. Мкртычев О. В., Сидоров Д. С. Современные подходы к определению предела огнестойкости зданий и сооружений // Вестник НИЦ "Строительство". — 2011. — № 3–4. — С. 96–111.

13. Тамразян А. Г., Звонов Ю. Н. К оценке надежности железобетонных плоских безбалочных плит перекрытий на продавливание при действии сосредоточенной силы в условиях высоких температур // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 7. — С. 24–28.
14. Тамразян А. Г., Звонов Ю. Н. К оценке надежности изгибаемых железобетонных плит при огневых воздействиях // Научное обозрение. — 2015. — № 14. — С. 130–133.
15. Кузнецова И. С., Соломонов В. В. Важные аспекты пожарной безопасности зданий и сооружений // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : III Всероссийская (II Международная) конференция. — В 7 т. — М. : МГСУ, 2014. — Т. 2. — С. 81–86.
16. Федоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. — М. : АСВ, 2009. — 408 с.
17. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. — М. : Пожнаука, 2001. — 382 с.
18. Молчадский И. С. Пожар в помещении. — М. : ВНИИПО, 2005. — 456 с.
19. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Исаева Л. К., Крылов Е. В. Процессы горения. — М. : Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1984. — 268 с.
20. Драйздейл Д. Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1990. — 424 с.

REFERENCES

1. F. Dehn, N. Werther, J. Knitl. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 8, pp. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. K. Kordina. Brände in unterirdischen verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. D. Korolchenko, A. Tusnin, S. Trushina, A. Korolchenko. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 21, pp. 42541–42548.
4. M. Law. A review of formulae for T-equivalent. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 985–996. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-985.
5. Mannan S. (ed.). *Lees' loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control*. 3rd ed. Texas, USA, Elsevier, Inc., 2005, vol. 1. 3708 p. DOI: 10.1016/b978-0-7506-7555-0.x5081-6.
6. A. Lucherini, L. Giuliani, G. Jomaas. 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.
7. N. Werther. Brandversuche an tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-nordtunnel in Madrid. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 9, pp. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
8. V. V. Zhukov, I. S. Molchadsky, V. N. Lavrov. Calculation of fire resistance limits of girderless floors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2006, no. 1, pp. 36–41 (in Russian).
9. A. Mehralizadeh. *Constructive safety of in-situ high-rised buildings with connected floors in case of emergency*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2014. 202 p. (in Russian).
10. A. G. Tamrazyan. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365, article number 052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021.
11. V. I. Golovanov, V. V. Pavlov, A. V. Pekhotikov. Experimental and analytical researches into fire resistance of continuous concrete slab with steel and composite reinforcement. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 2, pp. 44–51 (in Russian).
12. O. V. Mkrtichev, D. S. Sidorov. Modern approaches for determination of degree of fire resistance of buildings and facilities. *Vestnik NITs "Stroitelstvo" / Bulletin of Science and Research Center "Stroitelstvo"*, 2011, no. 3–4, pp. 96–111 (in Russian).
13. A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. To assessing the reliability reinforced concrete flat slabs for punching under the action of concentrated force at high temperatures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo / Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 7, pp. 24–28 (in Russian).
14. A. G. Tamrazyan, Yu. N. Zvonov. On assessing the reliability of bendable ferroconcrete plates under fire impact. *Nauchnoye obozreniye / Science Review*, 2015, no. 14, pp. 130–133 (in Russian).
15. I. S. Kyznetzova, V. V. Solomonov. Important aspects of building and construction fire safety. In: *Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushcheye* [Concrete and reinforced concrete — a look into future]. Proceedings of III Russian (II International) Conference. In 7 vols. Moscow, MGSU Publ., 2014, vol. 2, pp. 81–86.

16. V. S. Fedorov, V. E. Levitskiy, I. S. Molchadskiy, A. V. Aleksandrov. *Ognestoykost i pozharnaya opasnost stroitelnykh konstruktsey* [Fire resistance and fire hazard of constructions]. Moscow, ASV Publ., 2009. 408 p. (in Russian).
17. V. M. Roytman. *Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruyemykh i rekonstruyiruemyykh zdaniy* [Engineering solutions for evaluation of fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2001. 382 p. (in Russian).
18. I. S. Molchadskiy. *Pozhar v pomeshchenii* [Fire in a premise]. Moscow, VNIPO Publ., 2005. 456 p. (in Russian).
19. I. M. Abduragimov, A. S. Androsov, L. K. Isaeva, E. V. Krylov. *Protsessy goreniya* [Burning processes]. Moscow, Higher Engineering Fire and Technical School of Ministry of Interior of Russia Publ., 1984. 268 p. (in Russian).
20. D. D. Drayzdel. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985 (Russ. ed.: Drayzdel D. D. Vvedeniye v dinamiku pozharov. Moscow, Stroyizdat, 1990. 424 p.).

Поступила 11.02.2020, после доработки 18.03.2020;

принята к публикации 23.03.2020

Received February 11, 2020; Received in revised form March 18, 2020;

Accepted March 23, 2020

Информация об авторах

ТАМРАЗЯН Ашот Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55975413900; ORCID: 0000-0003-0569-4788; e-mail: tamrazian@mail.ru

ЗВОНОВ Юрий Николаевич, инженер, ООО “ПИК-Проект”, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 57207458579; ORCID: 0000-0002-2987-7426; e-mail: zvonovyn@mail.ru

Information about the authors

Ashot G. TAMRAZIAN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Reinforced and Stone Structures Department, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Author ID: 55975413900; ORCID: 0000-0003-0569-4788; e-mail: tamrazian@mail.ru

Yuriy N. ZVONOV, Engineer, ООО “PIK-Proyekt”, Moscow, Russian Federation; Author ID: 57207458579; ORCID: 0000-0002-2987-7426; e-mail: zvonovyn@mail.ru

Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий

© Т. Ю. Еремина, Ф. А. Портнов ✉

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Значимой проблемой в области строительства в Российской Федерации является невозможность возведения высотных деревянных объектов. Для решения данной проблемы необходимо изучить состояние вопроса за рубежом и в Российской Федерации и проанализировать перспективы развития этого направления.

Основная (аналитическая) часть. В статье приведены примеры возведения современных объектов (в Берлине, Лондоне, Мельбурне и других городах), отражающие состояние высотного деревянного строительства за рубежом. В рассмотренных зданиях совместно с преобладающими деревянными конструктивными и деревосодержащими отделочными материалами использованы железобетонные конструктивные элементы, необходимые для реализации сложных технических систем, что позволяет значительно сократить сроки их возведения. Кроме того, выбранный подход позволяет обеспечить значительную экологичность зданий и сооружений: благодаря использованию деревосодержащих материалов консервируются огромные объемы углекислоты и значительно снижаются ее выбросы в атмосферу во время строительных работ. В работе отражены основные положения технического регулирования в области нормирования пожарной безопасности строительных материалов и конструкций в Российской Федерации. Показано, что основные причины невозможности использования деревянных конструкций в высотных зданиях связаны с особенностями технического регулирования в Российской Федерации, в частности с отсутствием необходимых методик для проведения испытаний и сертификации деревосодержащих строительных конструкций в высотном строительстве. Показана необходимость оптимизации существующих методов для испытания деревянных строительных конструкций. Приведены примеры различных документов, регламентирующих производство и использование деревянных и композитных строительных конструкций. В работе детально отражен международный опыт реализации основных положений нормативных документов, а также европейские испытания на огнестойкость, что показывает возможность реализации подобного опыта в Российской Федерации.

Выводы. Для разработки нормативной основы для возможности использования конструкций из древесины в высотном строительстве необходимо проведение крупномасштабных экспериментов на деревянных конструкциях в целях изучения их огнестойкости. При этом необходимо учитывать особенности горючих строительных материалов.

Ключевые слова: нормирование в строительстве; крупномасштабные огневые испытания; зарубежный опыт; пожарная безопасность; эксплуатационные характеристики конструкций.

Для цитирования: Еремина Т. Ю., Портнов Ф. А. Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 34–43. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.34-43.

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

Problems and perspectives of fire resistance for wooden constructions in high-storey buildings

© Tatyana Yu. Eremina, Fedor A. Portnov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. A significant problem in construction area in the Russian Federation is the impossibility of high-rise wooden building. To solve this problem, it is necessary to study the state of the issue abroad and in the Russian Federation, and analyze the development prospects of this area.

Main (analytical) part. The article provides examples of modern facilities (in Berlin, London, Melbourne and other cities), reflecting the state of high-rise wooden construction abroad. In the buildings considered, together with the predominant wooden structural and wood-containing finishing materials, reinforced concrete structural elements necessary for the implementation of complex technical systems are used, which can significantly reduce the time of their construction. In addition, the chosen approach allows to enhance environmental friendliness of buildings and structures, — due to the use of wood-containing materials, huge volumes of carbon dioxide are preserved and its emissions into the atmosphere during construction work are significantly reduced. The paper

reflects the main provisions of technical regulation in the field of fire safety of building materials and structures in the Russian Federation. It is shown that the main reasons for the impossibility of using wooden structures in high-rise buildings are related to the peculiarities of technical regulation in the Russian Federation, in particular, the lack of the necessary methods for testing and certification of wooden building structures in high-rise construction. The necessity to optimize existing methods for testing wooden building structures is shown. Examples of various documents regulating the production and use of wooden and composite building structures are given. The work reflects in detail the international experience in the implementation of the main provisions of regulatory documents, as well as European tests for fire resistance, which shows the possibility of implementing such an experience in the Russian Federation.

Conclusions. To develop a regulatory framework for the possibility of using wood structures in high-rise construction, it is necessary to conduct large-scale experiments on wooden structures in order to study their fire resistance. In this case, it is necessary to take into account the features of combustible building materials.

Keywords: standardization in building; large-scale fire tests; foreign experience; fire safety; structural performance.

For citation: T. Yu. Eremina, F. A. Portnov. Problems and perspectives of fire resistance for wooden constructions in high-storey buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 34–43 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.34-43.

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

Введение

На протяжении четверти столетия вопросами исследования огнестойкости деревянных конструкций занимаются специалисты многих стран мира (Россия, Франция, США, Канада, Швейцария). Тем не менее по сравнению с традиционными строительными конструкциями эти исследования носят ограниченный характер. Это связано с редким применением деревянных конструкций в строительстве высотных зданий и отсутствием соответствующих методик проведения их испытаний. Особенно остро данный вопрос стоит в России. Одним из перспективных направлений исследований в области деревянного строительства является анализ поведения фрагментов зданий в условиях крупномасштабных огневых испытаний. Актуальность этих исследований связана с зарубежным опытом в данной области, который описан в ряде научных работ [1–3].

Современные технологии (клееная древесина, в частности CLT-панели (*Cross Laminated Timber*), композиты на основе ацетилированной древесины) позволяют создавать деревянные конструктивные элементы различных размеров и профилей, однако исходная древесина обладает высокой пожарной опасностью. Горючесть древесины исторически ограничивает ее использование в качестве строительного материала, что отражено в строительных нормах большинства стран, особенно для высотных зданий.

Целью настоящей работы является анализ состояния вопроса высотного деревянного строительства в целях обоснования необходимости разработки нормативных положений о возможности использования конструкций из древесины в высотном строительстве.

Задачи исследования:

- анализ зарубежного опыта строительства высотных зданий с использованием деревянных конструкций;

- оценка характеристик деревянных конструкций при использовании их в высотном строительстве и анализ методов оценки этих конструкций;
- оценка состояния российского сегмента строительства с точки зрения наличия действующих норм по оценке пожарной опасности древесных конструкций и материалов;
- анализ зарубежной нормативной базы в целях разработки российских аналогов в этой области.

Основная (аналитическая) часть

В ряде зарубежных стран в течение многих лет активно используют строительные конструкции из древесины для возведения высотных, в том числе жилых, зданий и сооружений. Весьма значимую роль в широком применении таких конструкций в высотном строительстве играют их исключительные эксплуатационные характеристики и экологическая сторона, что отражается во множестве научно-исследовательских работ [4–8]. В настоящей статье приведены наиболее значимые объекты высотного деревянного строительства.

В семиэтажном жилом здании Е3 в Берлине, построенном в 2008 г., все этажи, кроме цокольного, возведены из сборных деревянных конструктивных элементов. Несущая конструкция — каркас из клееных деревянных колонн и балок сечением 30×30 см, в который установлены массивные деревянные панели перекрытий и глухих стен, изготовленные по методу *brettstapel* (доски поставлены на кромку и скреплены гвоздями). Все промежутки между колоннами — глухие (панели) или остекленные [9], с широкими “французскими” окнами. После установки деревянных панелей перекрытий каждого этажа на них укладывали арматуру и заливали бетонную часть перекрытия. Таким образом, междуэтажная конструкция гибридная: нижняя часть — деревянная, верхняя — монолитная железобетонная. Деревянную поверхность в дальнейшем, на этапе

отделки, оставляли открытой, в результате чего все потолки в квартирах деревянные. На каждом этаже находится по одной квартире. Планировки всех квартир разные. Снаружи здания возведена открытая железобетонная лестница. Стены утеплены минеральной ватой и оштукатурены. Открытые колонны выполнены из стали и также покрыты штукатуркой по минераловатным матам.

Девятиэтажный дом Stadthaus в Лондоне, построенный в 2009 г., возведен с использованием многослойных клееных элементов из древесины. Значительное количество конструктивных элементов и проемов было изготовлено на высокоточном оборудовании на заводе, что обеспечило их высокое качество. Данная постройка была возведена менее чем за 50 недель, а на здание из подобных железобетонных конструкций (ЖБК) потребовалось бы времени примерно вдвое больше. Кроме того, для возведения несущих элементов понадобилось всего четыре строителя. Значительно снизились расходы на строительство в связи с возможностью использования менее сложных грузоподъемных механизмов.

Многэтажное здание Bridport в Лондоне возведено в 2011 г. В связи с особенностями строительного участка размещение тяжелых железобетонных конструкций было невозможно. Разумной альтернативой стало использование в качестве основного строительного материала многослойных клееных деревянных панелей. На возведение конструкции потребовалось лишь 12 недель. Для этого здания на заводе Stora Enso в Австрии изготовили 1576 м³ панелей CLT, которые были привезены в Лондон и доставлены на площадку с уже прикрепленными теплоизоляционными плитами из натурального волокна. Снаружи здание облицовано кирпичом. Внешний облик эффектно дополняют металлические консоли балконов. Здание выглядит так, как будто построено из кирпича, как и многие здания в Лондоне. Проект здания отмечен рядом общественных премий, в том числе за экологически ответственное строительство (в частности, за минимизацию так называемого углеродного следа). Согласно расчетам компании Wilmott Dixon благодаря выбору в пользу деревянного здания вместо бетонного в древесине конструкций законсервировано 2113 т углекислоты.

Жилое здание Forte Living высотой 32,2 м в Мельбурне возведено в 2012 г. с использованием 759 панелей, произведенных австрийской компанией KLN и доставленных в Австралию в 25 контейнерах. Здание является ярким примером комбинации железобетонных и деревянных конструкций. Для защиты нижних ярусов от насекомых было принято решение выполнить их из железобетона. Остальные конструкции здания изготовлены с исполь-

зованием деревянных конструктивных элементов. Деревянная конструкция собрана за 38 дней. Здание отвечает тем же требованиям по шумоизоляции и огнестойкости, что и железобетонное. Применение древесных материалов вместо бетона позволило предотвратить выброс в атмосферу и законсервировать в конструкциях здания 1451 т углекислоты. Ориентация застройщика на “зеленое” строительство проявилась не только в выборе конструкционного материала, но и в ряде ресурсосберегающих решений (светильники LED, система сбора дождевой воды и др.). Стоит отметить и широкие балконы с мини-огородами. Проекту присвоен сертификат Green Star Австралийского совета по экологически ответственному (“зеленому”) строительству (GBCA).

Девятиэтажный жилой комплекс Via Cenni возведен в Милане в 2013 г. Название объекта можно перевести как “здание с продуманным жизненным циклом”. Технология, предложенная компанией Cree GmbH, предполагает использование гибридных конструктивных элементов из клееной древесины, каркасных деревянных конструкций и железобетона. Лифтово-лестничный узел и цоколь здания выполнены из железобетона. Для стен применено довольно оригинальное решение — каркасные деревянные панели с уже прикрепленными к ним клееными деревянными колоннами. У сборных панелей перекрытия нижняя часть выполнена из клееных балок, верхняя — из железобетона. Эти части связаны арматурой и работают как одно целое, что обеспечивает высокую несущую и шумоизолирующую способность при существенной экономии основных стройматериалов. Клееные балки панелей перекрытия снизу остаются открытыми, являясь, наряду с деревянными колоннами, украшением интерьера, а пространство между балками используется для скрытой прокладки коммуникаций.

Четырнадцатипятиэтажный жилой дом Treet Bergen возведен в Бергене в 2015 г. По данным застройщика Bergen and Omegn Building Society (BOB) уже на начальном этапе строительства из 62 квартир этого дома половина были проданы. Особенностью проекта является сочетание в конструкции каркасных деревянных модулей, поставляемых с завода Kodumaja (Эстония) уже с готовой внутренней отделкой и установленными инженерными системами, и наружного мощного каркаса из клееных деревянных элементов метровой толщины в виде крупногабаритных ферм, поставляемых с завода Moelven (Норвегия). На завершающем этапе строительства здания был возведен фасад из стекла и бетонных элементов.

Здание Brock Commons в Канаде, построенное для проживания студентов, представляет собой совмещение технологий деревянного строительства и объемного с использованием железобетона. Фунда-

мент состоит из бетона, а для создания устойчивости здания конструкцию поддерживают железобетонные стержневые элементы. Кроме того, в таких значимых для обеспечения безопасности людей элементах, как лифтовые шахты и лестничные клетки, не обошлось без применения металлических конструкций. Остальная часть здания возведена исключительно из конструкций с использованием древесины. Эта особенность здания вместе с большим количеством древесных отделочных материалов обеспечивает его высокую экологичность, что наблюдалось и при строительстве, так как было отмечено значительное снижение выброса углекислого газа за счет использования большого количества древесных материалов вместо традиционных.

Деревянный комплекс NoHo Wien высотой 84 м, площадью 25 тыс. м² состоит из трех корпусов. В небоскребе есть жилая и деловая зоны, отель, ресторан, спортивный, косметический и оздоровительный центры. Около 75 % постройки (каркас, фасад, стены, отделка помещений) составляет дерево. По технологии деревянное здание возводится вокруг железобетонного колодца с лифтовыми шахтами, лестницами, коммуникациями и инженерными системами.

Десятиэтажный жилой комплекс Banyan Wharf с одно-, двух- и трехкомнатными апартаментами выполнен из стали и многослойной клееной древесины.

Благодаря использованию деревянных конструкций обеспечивается:

- экологичность строительства;
- устойчивость конструкции здания;
- теплоустойчивость здания;
- экономичность изготовления элементов;
- скорость монтажа.

В целом исследования огнестойкости деревянных конструкций носили ограниченный характер по сравнению с традиционными строительными конструкциями (металлические, железобетонные), так как деревянные конструкции применялись при проектировании высотных зданий крайне редко. Это связано также с отсутствием соответствующих методик проведения их испытаний. В международной практике при испытаниях на огнестойкость применяются следующие нормативные документы: ISO 834-1:1999 “Fire-Resistance Tests — Elements of Building Construction — Part 1: General Requirements”, ASTM E 119 “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials”, ГОСТ 30247.0–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования”, ГОСТ 30247.1–94 “Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции”, ГОСТ 30403–2012

“Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность”, ГОСТ Р 53309–2009 “Здания и фрагменты зданий. Метод натурных огневых испытаний. Общие требования”.

Одним из перспективных направлений по оценке огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий является анализ поведения фрагментов зданий в условиях крупномасштабных огневых испытаний.

Возможности проведения крупномасштабных специализированных исследований с натурными испытаниями фрагментов зданий привлекают внимание большого круга специалистов в области комплексной безопасности. В международном масштабе существует потребность в крупномасштабных специализированных испытаниях, результаты которых могут использоваться совместно различными странами. Крупномасштабное специализированное оборудование доступно в NIST, FM Global, Канадском национальном научно-исследовательском совете и Университете Карлтона в Оттаве, во Франции, в Японии и Австралии.

Международный опыт свидетельствует о том, что выбор высоты здания при проведении крупномасштабных специализированных исследований с натурными испытаниями его фрагментов имеет решающее значение. Для малоэтажных зданий обеспечение безопасности людей означает выполнение условия безопасной эвакуации из здания. В высотных зданиях многие люди могут оказаться над этажом возникновения пожара. Для зданий до 8 этажей (высота пожарных лестниц) существует возможность пожаротушения и спасения людей с помощью лестниц, но применение этих способов становится затруднительным, когда высота здания увеличивается более чем на 3 или 4 этажа. Чем больше высота здания, тем выше вероятность возникновения пожара на верхних этажах и вероятность блокирования людей на этажах выше этажа возникновения пожара [10]. При проектировании деревянных зданий высотой более 8 этажей требуется предусматривать увеличенную огнестойкость конструкций по сравнению с нормативной.

Существует также опасность вертикального распространения огня через окна, по деревянным фасадным облицовкам. Известно, что многие архитекторы рассматривают деревянные облицовочные покрытия как неотъемлемую часть деревянных зданий, по крайней мере при высоте до 8–10 этажей.

Кроме того, если огонь распространяется до отметки, которая выше максимальной высоты пожарных лестниц, для обеспечения безопасности людей необходимы соответствующие пределы огнестойкости конструкций и здания.

Таким образом, основное внимание в международных исследованиях уделяется огнестойкости деревянных конструкций и деревянных конструктивных элементов для узлов, соединений и поведению в условиях пожара композитных деревосодержащих материалов для изготовления фасадных деревянных панелей.

В Российской Федерации в соответствии со ст. 87 и табл. 21, 28 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности (Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ) использование деревянных конструкций в высотных зданиях ограничено.

Методология испытаний

В Российской Федерации возможность использования древесины в строительстве определяется группой испытаний, которые разделяются на испытания древесины в качестве строительного материала и в качестве строительной конструкции. Соответственно, древесине присваивается как класс пожарной опасности строительных материалов, так и класс пожарной опасности строительных конструкций [11, 12].

В Российской Федерации основным документом, регламентирующим проведение испытаний деревянных строительных конструкций, является ГОСТ 30403–2012. При испытаниях других типов строительных конструкций проводится оценка пределов огнестойкости металлических и железобетонных конструкций. Тем не менее в российских

нормативных документах отсутствуют положения и требования, необходимые для испытаний подобных деревянных конструкций.

В ГОСТ 30247.1–94 предельным состоянием по потере несущей способности (R) является обрушение конструкции или возникновение предельных деформаций. Кроме того, в данном документе регламентируется предельное состояние по теплоизолирующей способности (I), которое ограничивается достижением предельных температур на необогреваемой поверхности, а также по потере целостности (E) при возникновении сквозных отверстий и трещин, что приводит к проникновению сквозь них продуктов горения и пламени.

В ГОСТ Р 53295–2009 “Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности” описан метод определения времени достижения предельного состояния, характеризующегося критической температурой внутри образца или на его необогреваемой поверхности.

Метод, приведенный в ГОСТ 30403–2012, позволяет оценивать поведение строительной конструкции в натурных условиях: часть образца находится в огневой камере, что симулирует пожар, а часть отделена перегородкой с проемом, что позволяет оценивать поведение необогреваемых конструкций в случае возникновения пожара. На основании результатов подобных испытаний строительным конструкциям может быть присвоен класс пожарной опасности.

Таблица 1. Испытания по определению пожароопасных характеристик материалов в Российской Федерации

Table 1. Tests to determine the fire hazard characteristics of materials in the Russian Federation

Документ / Document	Основные положения / Keypoints
ГОСТ Р 57270–2016 “Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть” GOST R 57270–2016 “Building materials. Methods for combustibility tests”	Устанавливает методы определения группы строительных материалов по горючести на основании ряда параметров: температуры дымовых газов, степени повреждения по массе и длине, а также продолжительности самостоятельного горения It establishes methods to determine the combustibility of building materials based on a number of parameters of flammability: the temperature of smoke gases, the extent of damage by weight and length, as well as the duration of self-burning
ГОСТ Р 51032–97 “Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени” GOST R 51032–97 “Building materials. Spread flame test method”	Устанавливает метод определения группы по распространению пламени на основании определения критической поверхностной плотности теплового потока, необходимой для горения образца Establishes a method to determine the group of flame spread based on the determination of the critical surface density of the thermal flow necessary for the combustion of the sample
ГОСТ 12.1.044–89 “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения” GOST 12.1.044–89 “Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination”	Устанавливает методы определения группы по дымообразующей способности исходя из степени снижения видимости при дымообразовании образца, подвергающегося термическому разложению, а также группы по токсичности продуктов термического разложения на основании их воздействия на подопытных животных Establishes methods to determine the group of smoke-forming ability based on the degree of reduced visibility in the smoke formation of a sample subjected to thermal decomposition, as well as the toxicity group of thermal decomposition products based on their impact on experimental animals

Таблица 2. Зарубежные нормативные документы, регламентирующие производство и применение деревянных строительных конструкций / **Table 2.** Foreign regulations for production and use of wooden building structures

Документ, организация, страна Document, organization, country	Основные положения Keypoints
Fire Safety in Timber Buildings — Technical Guideline for Europe. SP Report 2010:19, Швеция [13] Fire Safety in Timber Buildings — Technical Guideline for Europe. SP Report 2010:19, Sweden [13]	Справочная информация и методы проектирования для деревянных зданий, которые должны иметь такую же пожарную безопасность, что и здания из других материалов. Системы классификации по реакции на воздействие огня строительных изделий, огнестойкость элементов конструкций, огнестойкость кровель, огнезащитные свойства облицовок. Пределы огнестойкости изделий из древесины в соответствии с европейской системой классификации: деревянные панели; конструкционные пиломатериалы; клееный брус (Glulam); панели из массива и деревянные полы. Характеристики класса К для деревянных облицовок с огнезащитной обработкой. Расчетные методы для противопожарных преград из древесины. Методы проверки структурной устойчивости деревянных конструкций в случае пожара с применением классификации по огнестойкости по критерию R. Основные требования к композитным материалам. Решения по предотвращению распространения огня между частями здания Information and design methods for wooden buildings that should have the same fire safety as buildings made of other materials. Systems of classification of the reaction to the impact of fire construction products, fire resistance of elements of structures, fire resistance of roofs, fire retardant properties of cladding. Limits of fire resistance of wood products in accordance with the European classification system: wooden panels; structural lumber; glued beam (Glulam); panels made of wooden array and wooden floors. K class characteristics for wood cladding with fire retardant treatment. Calculated methods for fire barriers from wood. Methods to check the structural stability of wooden structures in the event of a fire using the classification of the R criterion on fire resistance. Basic requirements for composite materials. Decisions to prevent the spread of fire between parts of the building
R. Gerard, D. Barber, A. Wolski, 2013. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Arup North America Ltd. San Francisco, CA, and Fire Protection Research Foundation Quincy, MA, U.S.A [14]	Всесторонний анализ проблем, необходимый для будущих исследований и испытаний: испытания на огнестойкость инновационных деревянных конструкций и смешанных решений; полномасштабные/крупномасштабные огневые испытания макетов высоких деревянных каркасов; экономический анализ для количественной оценки строительства, эксплуатации и стоимости высотных деревянных зданий; эффективный обмен информацией о рисках Comprehensive analysis of the problems needed for future research and testing: test on fire resistance of innovative wooden designs and mixed solutions; full-scale/large-scale fire tests of high wooden frame layouts; economic analysis to quantify the construction, operation and cost of high-rise wooden buildings; effective sharing of information about risks
FP Innovations, 2013, проект “Технического руководства по проектированию и строительству высоких деревянных зданий в Канаде” FP Innovations, 2013, Project “Technical guidance for the design and construction of tall wooden buildings in Canada”	Разработка “альтернативного проекта”, который соответствует минимальным требованиям к “приемлемым решениям” NBCC (National Building Code of Canada) Develop an “alternative project” that meets the minimum requirements for “acceptable solutions” NBCC (National Building Code of Canada)

Для решения проблемы необходима оптимизация нормативных положений, регламентирующих проведение испытаний для деревянных конструкций (табл. 1).

Так, при испытаниях изгибаемых конструкций по ГОСТ 30247.1–94 предельным состоянием по

потере несущей способности является обрушение конструкции или возникновение предельных деформаций, что может быть использовано в рамках исследования деревянных конструкций. Известно, что расчетным критерием для определения предела огнестойкости древесных конструкций (например,

деревянной балки) является время достижения предельной площади сечения, при котором прочность сечения станет равной расчетному изгибающему моменту от нагрузки. Очевидно, что современные методы расчета должны иметь экспериментальное подтверждение, что в свою очередь требует разработки соответствующих методов испытаний.

Достаточно проработанным в Российской Федерации является вопрос определения класса пожарной опасности строительных материалов, который складывается из групп пожарной опасности. По совокупности характеристик материалов конструкций по пожарной опасности устанавливается класс конструктивной пожарной опасности здания.

В европейских странах в рамках программы “Деревянная Европа” и аналогичных программ разрабатываются различные документы, регламентирующие производство и использование деревянных и композитных строительных конструкций (табл. 2).

Международный опыт реализации основных положений нормативных документов

Вопросы огнесохранности древесных материалов и конструкций рассматриваются в большом количестве зарубежных научных работ [13–16]. Ванкуверский архитектор Майкл Грин (Michael Green) (2012) представил возможные проекты 10-, 20- и

Таблица 3. Европейские испытания на огнестойкость / **Table 3.** European fire resistance tests

Испытания / Tests	Основные результаты / Key results
Hakkarainen, 2002: комнатные испытания на огнестойкость деревянных конструкций с инкапсуляцией и без нее Hakkarainen, 2002: room tests on fire resistance of wooden structures with and without encapsulation	Температура в помещении во время пожара во всех случаях была одинаковой, но из-за некапсулированных (без конструктивной огнезащиты) деревянных конструкций наблюдался сильный выброс пламени из окон. Это было вызвано негоревшими газами, образующимися в помещении из-за недостатка кислорода The temperature in the room during the fire in all cases was the same, but from un-encapsulated (without constructive fire protection) wood structures there was a strong flame coming out of the windows. This was caused by unburned gases forming indoors due to lack of oxygen
Frangi and Fontana, 2005: испытания в Швейцарии Frangi and Fontana, 2005: Tests in Switzerland	Результаты, аналогичные Hakkarainen, 2002. Продemonстрировано также, что путем адекватной защиты конструкции древесины можно добиться полного выгорания пожарного отсека без применения пожаротушения без какого-либо существенного повреждения структуры древесины. Серия испытаний, выполненных с активированным спринклером, подтвердила, что с помощью спринклерной системы с быстрым откликом влияние горючей конструкции на пожарную безопасность компенсируется и цели пожарной безопасности могут быть достигнуты и при наличии горючих деревянных конструкций. Несмотря на быстрое развитие пожара, конструкция не была повреждена, потому что спринклерная система потушила пожар на ранней стадии Results similar to Hakkarainen, 2002. It has also been demonstrated that by adequately protecting the wood structure, it is possible to achieve the complete burnout of the fire compartment without the use of firefighting, without any significant damage to the structure of the wood. A series of tests performed with an activated sprinkler confirmed that with a rapid response sprinkler system, the impact of combustible structures on fire safety is compensated and fire safety targets can be achieved with availability of combustible wooden structures. Despite the rapid development of the fire, the structure was not damaged because the sprinkler system extinguished the fire at an early stage
Frangi et al., 2008: полномасштабное испытание 3-этажного здания, изготовленного из панелей CLT, в условиях естественного пожара; панели CLT защищены одним или двумя слоями негорючих гипсокартонных листов Frangi et al., 2008: a full-scale test of a three-storey building made of CLT panels was carried out in a natural fire environment; CLT panels were protected by one or two layers of non-flammable drywall sheets	Испытания подтвердили, что с помощью конструктивных мер можно ограничить распространение огня в одном помещении даже при наличии деревянных конструкций The test confirmed that with the help of constructive measures it is possible to limit the spread of fire in one room even if there are wooden structures

30-этажных деревянных зданий в документе “The Case for Tall Wood Buildings — How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures”.

Skidmore Owings и Merrill (SOM, 2013) подготовили технико-экономическое обоснование для 42-этажного деревянного здания в Чикаго “The Timber Tower Research Project”, основанное на анализе существующей железобетонной башни того же размера. В работе подчеркнута необходимость анализа времени выгорания и исключения распространения пожара по этажам [10]. Рекомендованы также испытания на воспламеняемость (табл. 3).

Бьюкенен (2001) в документе “Structural Design for Fire Safety” выделяет четыре критерия, которые учитываются при определении уровня огнестойкости в зависимости от размера и типа здания:

- время безопасной эвакуации;
- время проведения спасательных работ пожарными;
- время локализации и ликвидации огня пожарными;
- полное выгорание пожарного отсека без вмешательства пожарных подразделений.

Таким образом, еще раз подчеркнем, что при реализации проектов с заданными технико-экономическими показателями различные национальные нормативные документы по пожарной безопасности содержат следующие требования, направленные на обеспечение:

- заданных техническими регламентами пределов огнестойкости конструкций и степени огнестойкости здания;
- пожаробезопасности, эквивалентной стальной или бетонной конструкции, соответствующей стандартам;
- фактических пределов огнестойкости (для обеспечения безопасной эвакуации и/или пожаротушения);
- огнесохранности до полного выгорания при отсутствии пожаротушения.

Высотные здания должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить очень низкую вероятность распространения пожара на верхние этажи и очень низкую вероятность разрушения конструкции в любой момент пожара, независимо от того, есть ли способы влияния на развитие пожара (пожарные подразделения, системы пожаротушения) [10].

Заключение

Для разработки нормативных положений о возможности использования конструкций из древесины в высотном строительстве необходимо проведение крупномасштабных экспериментов на деревянных конструкциях. Основной тенденцией в данных экспериментах является анализ модели “выгорания пожарных отсеков” и исследование разрушения конструкций и вертикального распространения огня. Необходима оптимизация методологических положений в техническом регулировании данного вопроса. На основании подобной оптимизации возможно расширение научно-технической базы. Научные работы, которые могут быть основой для дальнейших исследований в этой области, уже проводятся российскими специалистами [17–20].

В связи с увеличением объемов строительства многоэтажных деревянных зданий важно тщательно учитывать свойства горючих материалов, в частности когда не предусмотрена герметизация или устройство спринклеров. Например:

- определить поведение деревянных конструкций (с учетом сечения, пород древесины, структуры конструкции) в условиях пожара;
- исследовать развитие пожара при наличии пустот в вертикальных и горизонтальных деревянных конструкциях;
- определить влияние активной и пассивной противопожарной защиты на возможность снижения пределов огнестойкости конструкций и степени огнестойкости здания;
- прогнозировать пределы огнестойкости в случае отказа активной и пассивной противопожарной защиты;
- определить скорость обугливания как функции воздействия огня и исследовать условия самозатухания обугленной деревянной конструкции для моделирования расчетных значений пожара;
- способствовать созданию международной базы данных о времени разрушения облицовки и определить характер распространения пожара по деревянным фасадным облицовкам в высотных зданиях;
- изучить эксплуатационные характеристики и устойчивость различных типов соединений в условиях пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hodgin D. A.* Mid-rise wood frame construction: a good idea or are we asking for trouble? // Eighth Congress on Forensic Engineering (November 29 – December 2, 2018, Austin, Texas). — Reston, Virginia : American Society of Civil Engineers, 2018. — P. 62–72. DOI: 10.1061/9780784482018.007.
2. *Wimmers G.* Wood: a construction material for tall buildings // Nature Reviews Materials. — 2017. — Vol. 2, No. 12. — Article Number 17051. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.51.

3. Mohammadi J., Ling L. Can wood become an alternative material for tall building construction? // *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. — 2017. — Vol. 22, No. 4. — Article Number 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000334.
4. Деглиз К. “Экологический менеджмент” лесов и изделий из древесины // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. — 2017. — Т. 21, № 4. — С. 6–9. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-6-9.
5. Pastori Z., Czipy I., Gorbacheva G. A. Using poplar stud elements in light frame wall structure instead of coniferous // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. — 2017. — Vol. 21, No. 4. — P. 89–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-89-94.
6. Pasztory Z., Peralta P. N., Molnar S., Peszlen I. Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls // *Energy and Buildings*. — 2012. — Vol. 49. — P. 142–147. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.02.003.
7. Ramage M. H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D. U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P. F., Scherman O. The wood from the trees: The use of timber in construction // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2017. — Vol. 68. — P. 333–359. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
8. Kaushik K., Tannert T. Feasibility study of a novel tall concrete-wood hybrid system // *Structures Congress 2017: Business, Professional Practice, Education, Research, and Disaster Management (April 6–8, 2017, Denver, Colorado)*. — Reston, Virginia : American Society of Civil Engineers, 2017. — P. 411–418. DOI: 10.1061/9780784480427.035.
9. Беличенко М. Ю., Ахметова Л. Р., Дроздов В. А. Строительство многоэтажных зданий на основе древесины // *Проблемы современной науки и инновации*. — 2016. — № 12. — С. 31–37.
10. Buchanan A., Östman B., Frangi A. White paper on fire resistance of timber structures / NIST.GCR.15-985. — 2014. — 24 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2015/NIST.GCR.15-985.pdf> (дата обращения: 05.02.2020).
11. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. — М. : Пожнаука, 2001. — 382 с.
12. Михалева С. А. Деревянные высотки в России — инновационный взгляд на современное строительство // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2016. — № 4-7(46). — С. 19–21. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.174.
13. Östman B., Winter S., Mikkola E. Fire safety in timber buildings — Technical guideline for Europe / SP Report 2010:19. — Stockholm, Sweden : SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. — 88 p.
14. Gerard R., Barber D., Wolski A. Fire safety challenges of tall wood buildings. — San Francisco, CA : Arup North America Ltd.; Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2013. — 162 p.
15. Bartlett A. I., Hadden R. M., Bisby L. A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // *Fire Technology*. — 2019. — Vol. 55, No. 1. — P. 1–49. DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
16. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure // *Fire Technology*. — 2016. — Vol. 52, No. 4. — P. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2.
17. Асеева П. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 19–32.
18. Покровская Е. Н., Портнов Ф. А., Кобелев А. А., Корольченко Д. А. Дымообразующая способность и токсичность продуктов сгорания древесных материалов при поверхностном модифицировании элементоорганическими соединениями // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 40–45.
19. Eremina T. Yu., Korolchenko D. A., Kuznetsova I. N. Comprehensive assessment of fire protective intumescent paint “terma” // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1425. — Article Number 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012099.
20. Konstantinova N. I., Eremina T. Yu., Kuznetsova I. N. Development of fireproof textile materials safe on contact with human skin // *Fibre Chemistry*. — 2019. — Vol. 51, No. 2. — P. 131–134. DOI: 10.1007/s10692-019-10058-9.

REFERENCES

1. D. A. Hodgin. Mid-rise wood frame construction: a good idea or are we asking for trouble?. In: *Proceedings of Eighth Congress on Forensic Engineering (November 29 – December 2, 2018, Austin, Texas)*. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers, 2018, pp. 62–72. DOI: 10.1061/9780784482018.007.
2. G. Wimmers. Wood: a construction material for tall buildings. *Nature Reviews Materials*, 2017, vol. 2, no. 12, article number 17051. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.51.
3. J. Mohammadi, L. Ling. Can wood become an alternative material for tall building construction? *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2017, vol. 22, no. 4, article number 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000334.
4. X. Deglise. “Ecological management” of forests and wood products. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 6–9 (in Russian). DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-6-9.X.

5. Z. Pastori, I. Czupy, G. A. Gorbacheva. Using poplar stud elements in light frame wall structure instead of coniferous. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 89–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-89-94.
6. Z. Pasztory, P. N. Peralta, S. Molnar, I. Peszlen. Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 49, pp. 142–147. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.02.003.
7. M. H. Ramage, H. Burrige, M. Busse-Wicher, G. Fereday, T. Reynolds, D. U. Shah, G. Wu, L. Yu, P. Fleming, D. Densley-Tingley, J. Allwood, P. Dupree, P. F. Linden, O. Scherman. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 333–359. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
8. K. Kaushik, T. Tannert. Feasibility study of a novel tall concrete-wood hybrid system. In: *Structures Congress 2017: Business, Professional Practice, Education, Research, and Disaster Management (April 6–8, 2017, Denver, Colorado)*. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers, 2017, pp. 411–418. DOI: 10.1061/9780784480427.035.
9. M. U. Belichenko, L. R. Ahmetova, V. A. Drozdov. Multi-storey construction of the wood based buildings. *Problemy sovremennoy nauki i innovatsii / Problems of Modern Science and Innovation*, 2016, no. 12, pp. 31–37 (in Russian).
10. A. Buchanan, B. Östman, A. Frangi. *White paper on fire resistance of timber structures*. NIST.GCR.15-985, 2014. 24 p. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2015/NIST.GCR.15-985.pdf> (Accessed February 2, 2020).
11. V. M. Roytman. *Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemyykh i rekonstruiuemyykh zdaniy* [Engineering solutions for evaluation of fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2001. 382 p. (in Russian).
12. S. A. Mikhaleva. Wooden skyscraper in Russia — an innovative approach to modern construction. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal / International Research Journal*, 2016, no. 4-7(46), pp. 19–21 (in Russian). DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.174.
13. B. Östman, S. Winter, E. Mikkola. *Fire safety in timber buildings — Technical guideline for Europe. SP Report 2010:19*. Stockholm, Sweden, SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. 88 p.
14. R. Gerard, D. Barber, A. Wolski. *Fire safety challenges of tall wood buildings*. San Francisco, CA, Arup North America Ltd.; Quincy, MA, Fire Protection Research Foundation, 2013. 162 p.
15. A. I. Bartlett, R. M. Hadden, L. A. Bisby. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction. *Fire Technology*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 1–49. DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
16. J. Suzuki, T. Mizukami, T. Naruse, Y. Araki. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2.
17. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19–32 (in Russian).
18. E. N. Pokrovskaya, F. A. Portnov, A. A. Kobelev, D. A. Korolchenko. The smoke generation property and combustion products toxicity of wood which was modified by organoelemental compounds. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 40–45 (in Russian).
19. T. Yu. Eremina, D. A. Korolchenko, I. N. Kuznetsova. Comprehensive assessment of fire protective intumescent paint “terma”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1425, article number 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012099.
20. N. I. Konstantinova, T. Yu. Eremina, I. N. Kuznetsova. Development of fireproof textile materials safe on contact with human skin. *Fibre Chemistry*, 2019, vol. 51, no. 2, pp. 131–134. DOI: 10.1007/s10692-019-10058-9.

Поступила 11.01.2020, после доработки 18.03.2020; принята к публикации 27.03.2020
Received January 11, 2020; Received in revised form March 18, 2020; Accepted March 27, 2020

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Управление пожаровзрывобезопасностью на объектах ТЭК в особых условиях

© И. В. Самарин ✉

Российский государственный университет нефти и газа
(Национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
(Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 65, корп. 1)

РЕЗЮМЕ

Введение. Ответственность за пожарную безопасность (ПБ) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) лежит на лицах, принимающих решения (ЛПР). Отмечен факт влияния интенсификации производства и роста объема данных на интенсивность нагрузки на персонал, что увеличивает вероятность ошибок при принятии решений ЛПР. Автоматизация и применение информационных технологий позволяют оптимизировать производственные процессы должным образом, однако уровень ответственности ЛПР при этом не снижается. Целью работы является обоснование актуальности и необходимости использования методов стратегического планирования при совершенствовании планирования мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности (ПВБ) на объектах ТЭК в особых условиях.

Теоретические основы. Проанализированы такие понятия, как стратегия, агрегатная цель, горизонт планирования, целевая функция, неформализуемая информация. На основании взаимосвязи локальных и главных целей стратегии обоснована необходимость создания дерева планов в помощь ЛПР для осуществления и контроля действий над объектом управления. Описано соотношение агрегатной цели и стратегии, состоящей из последовательности действий ЛПР по достижению определенных значений агрегатного показателя качества.

Результаты исследования. Обоснована необходимость применения методов стратегического планирования в целях сохранения показателей эффективности деятельности ЛПР на объектах ТЭК по направлению обеспечения ПВБ в изменяющихся особых условиях. Представлена характеристика данных условий, а также причины их появления. При отсутствии необходимых методов планирования и управления в таких условиях допустимое время реакции на изменение среды будет превышать. Для преодоления тенденции снижения эффективности работы ЛПР на объектах ТЭК в особых условиях предложено применять программно-аппаратный комплекс информационно-аналитической системы стратегического планирования (ИАССП) мероприятий ПВБ.

Заключение. Отмечена связь числа ошибок ЛПР при принятии им решений для подсистем ПВБ с увеличением объема информации от средств накопления и передачи данных. Важно адаптировать подсистемы обеспечения ПВБ к новым особым условиям с применением ИАССП.

Ключевые слова: агрегатный показатель; автоматизированная система управления технологическими процессами; автоматизированная система управления производством; корпоративная информационная система; пожарная безопасность; дежурная смена; управление; принятие решений; стратегия; оценка.

Для цитирования: Самарин И. В. Управление пожаровзрывобезопасностью на объектах ТЭК в особых условиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 44–52. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.44-52.

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

Fire and explosion safety management at fuel and energy facilities in special conditions

© Ilya V. Samarina ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The decision-makers (DM) are bear responsibility for fire safety (FS) at the fuel and energy complex (FEC) facilities. There is the fact of the impact of production intensification and data volume growth on the intensity of the load on the human resources. Which in turn increases the probability of errors of the DM. Automation and the use of information technologies allow us to optimize production processes. However, the level of responsibility of the DM is not reduced. In addition, it is noted that the reserve of time for decision making at the FEC facilities is being reduced. The objective of scientific research is to substantiate the relevance and necessity of using stra-

tegic planning methods in improving the planning of fire and explosion safety (FES) activities at the FEC facilities in special conditions.

Theoretical bases. Such concepts as strategy, aggregate goal, planning horizon, target function, and non-formalized information are analyzed. The necessity of creating a tree of plans for the DM in order to conduct and control actions over the management object is justified. There is described the relationship between an aggregate goal and a strategy consisting of a sequence of actions by the DM to achieve certain values of aggregate quality indicator.

Research results. This part of article justifies the necessity of applying strategic planning methods in order to preserve the performance indicators for DM at FEC facilities in the direction of FES in changing special conditions. The characteristics of these conditions and the reasons for their occurrence are presented. In the absence of necessary planning and management methods in such conditions, the acceptable response time to a change in the environment will be exceeded. In order to overcome the tendency to reduce the efficiency of DM at FEC facilities in special conditions, it is proposed to use the software-hardware complex of the information and analytical system for strategic planning of FES activities.

Conclusion. Finally, it was noted the relationship between the number of errors of DM in the decision making process for subsystems of the FES and the increase in the volume of information from the means of accumulation and transmission data. It is really important to adapt the FES subsystems to the new special conditions with the use suggested information and analytical system for strategic planning.

Keywords: aggregate indicator; automated process control system; automated production management system; corporate information system; fire safety; duty shift; management; decision-making; strategy; evaluation.

For citation: I. V. Samarin. Fire and explosion safety management at fuel and energy facilities in special conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 44–52 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.44-52.

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

Введение

Объекты топливно-энергетического комплекса (ТЭК) являются важной составляющей отечественной промышленности. Технологические процессы, обеспечивающие получение продукции на объектах ТЭК, связаны с горючими и взрывоопасными веществами, что заставляет применять на них мероприятия по обеспечению пожарной безопасности (ПБ) и пожаровзрывобезопасности (ПВБ) с особой скрупулезностью и вниманием. Меры по предотвращению пожаров, взрывов и чрезвычайных ситуаций являются важной частью вспомогательных, обеспечивающих основную деятельность процессов на объектах ТЭК [1, 2]. От их соблюдения зависит предупреждение нештатных ситуаций, способных стать причиной возникновения пожаров и взрывов. В условиях санкций возник ряд запретов, например, в нефтегазовой отрасли. В связи с этим роль малых и средних предприятий в развитии внутреннего рынка возросла [3]. И если на крупных предприятиях подход к обеспечению требуемого уровня ПБ строго регламентирован и в необходимой степени автоматизирован, то малые и средние предприятия сталкиваются с определенными трудностями.

Наибольшая ответственность за обеспечение ПБ в текущем процессе производства или транспортировки подобной продукции лежит на дежурной смене объектов ТЭК. Общее руководство мероприятиями ПБ возлагается, как правило, на начальника дежурной смены объекта ТЭК, который и является главным звеном в управлении процессом обеспечения ПБ — лицом, принимающим решения (ЛПР). ЛПР следит за текущим выполнением технологиче-

ских процессов и за их обеспечением, основываясь на комплексе различных планов.

В состав данного комплекса планов включаются оперативные, среднесрочные и стратегические планы предприятия, которые содержат подробные рекомендации по различным направлениям. Число таких планов на объектах ТЭК достаточно велико, а в современных условиях еще больше возрастает в связи с интенсификацией производственных и обеспечивающих процессов. Увеличивается также объем мероприятий в комплексах планов ЛПР.

Рост числа мероприятий в указанных процессах при неизменном числе сотрудников объекта ТЭК, обеспечивающих контроль за их выполнением, приводит к увеличению интенсивности нагрузки на персонал дежурной смены в целом и на ЛПР в частности. Данная проблема частично может быть решена путем автоматизации деятельности. Частично потому, что, несмотря на активное применение новых информационных технологий (ИТ), в том числе средств поддержки управления “Индустрии 4.0”, принятие решений при управлении объектом ТЭК остается за ЛПР. Следует отметить активный рост внедрения в настоящее время систем виртуальных производств, инструментов “Индустрии 4.0” на объектах ТЭК [4–6]. Однако увеличение числа объектов контроля, автоматизация которых выполнена с помощью ИТ, не снимает с ЛПР ответственности за принимаемые решения. Наоборот, повышение интенсивности производства и применение новых ИТ с различными новыми инструментами получения информации только увеличивает нагрузку на персонал дежурной смены и ее руководителя, так как

растет число вынужденно принимаемых ими решений в единицу времени. В то же время число людей в составе дежурной смены остается неизменным. При этом следует отметить, что в современных условиях резерв времени на принятие ЛПР решений сокращается.

В связи с этим применение нового программно-обеспечения (ПО) для автоматизации поддержки принятия решений ЛПР требует дополнительных средств поддержки управления, которые бы не только информировали ЛПР о необходимости принятия решений в соответствии с используемыми планами, но и давали ему возможность принимать обоснованные решения в более краткие сроки.

Таким образом, ЛПР очень важно понимать, что принимаемые им решения должны укладываться в общую стратегию по выполнению определенной деятельности, в частности по обеспечению ПVB на объекте ТЭК. Для этого ему необходимо среди всех прочих данных выделить цель и стратегию, от которых напрямую будут зависеть его действия при принятии решений.

Целью настоящей работы является обоснование преимуществ аппарата стратегического планирования при работе с возрастающим объемом мероприятий по обеспечению ПБ, связанных с комплексом оперативных, среднесрочных и стратегических планов предприятий. Ставится задача обоснования важности и необходимости использования методов стратегического планирования при совершенствовании механизма планирования мероприятий по обеспечению ПVB на объектах ТЭК. Для решения обозначенных задач первоначально описывается теоретическая база: понятия агрегатной цели, стратегии, целевой функции, неформализуемой информации и др. Применение предлагаемых методов планирования во многом зависит от совершенствования процесса поддержки управления мероприятиями по обеспечению ПVB на объектах ТЭК в особых условиях. Для этого предлагается рассмотреть возможность разработки специального ПО, включающего алгоритмы расчета параметров моделей прогнозирования и предотвращения сложных опасных ситуаций на объектах ТЭК.

Теоретические основы

В ряде источников под целью принято понимать “заранее мыслимый результат сознательной деятельности” [7], желаемое состояние соответствующего объекта планирования в определенный момент будущего. Для понятия “стратегия” можно найти следующие определения. В [8] стратегия трактуется как рациональный набор правил и приемов, которые позволяют реализовать миссию, достигнуть глобальных и локальных целей. Согласно ГОСТ Р

ИСО 9000:2015 цель — это “результат, который должен быть достигнут” (п. 3.7.1), стратегия — “план достижения долгосрочной или общей цели” (п. 3.5.12). Руководствуясь данными определениями, можно сказать, что цель — некоторая задача на перспективу для ЛПР (в нашем случае), а стратегия — это поэтапный план ее решения.

Реализуя различные стратегии, ЛПР выбирает последовательность шагов по достижению одной или нескольких определенных целей, инструмент оценки своих действий и соответствующие показатели качества. Следует отметить, что определения не раскрывают того, как субъект управления предпринимает действия для объекта управления. Однако их поэтапный характер означает, что для их выполнения и контроля реализации ЛПР необходимо создание дерева планов. Это следует из того, что для достижения цели при применении ЛПР стратегии шаги выполняются в определенной последовательности и на каждом из них может выбираться локальная цель, координируемая с главной целью стратегии посредством сравнения значений локального и интегрального показателей качества с некоторыми допустимыми значениями.

Согласно определению стратегии цели управления в ней бывают нескольких (как минимум двух) видов. Среди всех возможных при реализации стратегии целей ЛПР выбирает главную (глобальную) цель. Ее также называют основной, или агрегатной, так как она аккумулирует в себе все остальные стремления к ее достижению. Основная (или агрегатная) цель — это та цель, которая должна быть достигнута (в плановом периоде, если она привязана ко времени). Она является комплексной и включает в себя как внутренние, так и внешние ориентиры деятельности (в нашем случае для проведения и контроля ЛПР мероприятий ПБ на объекте ТЭК), выражая суть того будущего, которого необходимо добиться субъекту управления. Она является базисом и точкой опоры для всех плановых решений, для дальнейшего определения целей и задач. Агрегатная цель, как правило, связана, во-первых, с определенным горизонтом планирования [9], а во-вторых, с планированием мероприятий по ее достижению.

Важно понимать, что главная цель в стратегии ЛПР может и не зависеть от времени. При этом общая цель действий ЛПР будет величиной постоянной. В математическом смысле это может означать, что для оценки своих действий по достижению главной цели вне стратегий ЛПР использует единственную, не зависящую от времени целевую функцию. Целевая функция (или в некоторых случаях показатель качества) — это функция, как правило, нескольких независимых переменных, которая в условиях конкретной математической задачи должна быть мини-

мизирована или максимизирована при использовании заданной совокупности дополнительных ограничений, налагаемых на используемые в ней (независимые) переменные. Такая функция позволяет оценить степень приближения к выбранному уровню значений для достижения агрегатной цели управления ЛПР процессом обеспечения ПБ на объекте ТЭК. При этом допустимое отклонение значений целевой функции от необходимого значения служит допуском, на основании которого ЛПР определяет, достигнута цель управления или нет. Агрегатная цель, выраженная через агрегатный показатель качества, является высшим (и часто окончательным) уровнем оценки действий ЛПР. Совокупность его действий по достижению определенных значений агрегатного показателя качества, как правило, составляет стратегию.

Широкое применение средств автоматизации технологических процессов на объектах ТЭК привело к появлению новых точек контроля их качества. В результате, как уже говорилось ранее, на ЛПР и его дежурную смену легла значительная дополнительная нагрузка, связанная с анализом большого числа данных, обновляемых в реальном времени. Это привело к снижению эффективности управления, в том числе мероприятиями ПБ. Такое положение может быть исправлено путем создания новых программных средств на основе искусственного интеллекта, которые в автоматизированном или автоматическом режиме будут выполнять ряд функций анализа и выдавать ЛПР альтернативные варианты действий для управления, исходя из текущих, рассчитанных в реальном времени значений агрегатных показателей качества.

Учитывая, что при переходе от агрегатной цели к уровню стратегии ЛПР вынужден использовать более сложный математический аппарат, в котором может быть несколько целевых функций, как зависящих, так и не зависящих друг от друга, для реализации главной цели в стратегии управления ситуацией на объекте ТЭК ЛПР необходимо гораздо больше допусков для оценки различных показателей качества. В настоящее время принятой практикой для ЛПР является использование его опыта работы для определения допустимых значений этих показателей, что позволит ему держать ситуацию под контролем.

Выполняя такую оценку, ЛПР фактически занимается стратегическим планированием, которое следует определить так. Это процедура выбора в условиях неопределенности решения о наборе действий (расходования ресурсов, обеспечения безопасности, проведения мероприятий по оценке), рациональных с точки зрения максимального продвижения к стратегической цели. Такая цель может определять-

ся как основной целью ЛПР (миссией предприятия), так и задачами вспомогательных и обеспечивающих эту деятельность процессов. Одним из таких процессов, например, может быть обеспечение качества противопожарных мероприятий. Стратегическое планирование может также представлять собой одну из функций управления, с помощью которой реализуется процесс обоснования приоритетных целей и рациональных путей их достижения в условиях большого объема неформализуемой информации и значительных неопределенностей внешней среды [10].

Неформализуемая информация, как и любая информация другого типа, для использования в формальных математических построениях должна быть определена. Для этого воспользуемся следующими понятиями. Формальное описание — это описание в специфических терминах и символьных обозначениях той или иной теории [11]. Формализованное описание — содержательное описание с элементами формального описания [11]. Из приведенных определений следует, что неформализуемая информация — это информация, которая не описана с помощью формул, символов или содержательных элементов. При этом данная информация все же должна определенным образом отражаться в формальных математических построениях. Реализовать это можно несколькими способами.

Первый и наиболее очевидный из них — это аппарат теории вероятности, использующий категорию случайных событий. При использовании данного метода значения переменных, представляющих собой неформализуемую информацию, используемую в стратегическом планировании, будут заменены либо математическими аналогами (математическим ожиданием случайной величины, дисперсией, значением функции распределения вероятностей, умноженной на среднее за период значение, и т. п.), либо статистическими оценками.

Другой способ формирования значений неформализуемых величин — метод экспертных оценок. В связи с этим уместно опять обратиться к определениям. Эксперт — это специалист в определенной области, способный на основе своих знаний и опыта дать пользователю квалифицированную консультацию (совет, подсказку), помочь принять правильное решение. В экспертных системах знания экспертов являются источником формирования баз знаний. Пользователем в данном случае может являться ЛПР.

Аналогичное определение связано с методами работы экспертов. Экспертные методы — методы системного анализа, в которых для проведения тех или иных неформализуемых операций используются знания, опыт, интуиция, изобретательность, ин-

теллект экспертов, специалистов в соответствующей области [12]. Используя экспертные оценки, можно выполнять необходимые расчеты на основании предположений о значениях неформализуемых переменных целевых функций. Такие оценки будут в дальнейшем применяться вместо значений переменных или иных объектов, которые предстоит использовать в формальных описаниях процессов.

Результаты исследования

Переходя от теоретического обоснования рассматриваемых процессов планирования и управления мероприятиями ПБ к обоснованию необходимости применения методов стратегического планирования в процессе работы с мероприятиями по обеспечению ПБ, вспомним, что на объекты ТЭК в связи с усилением конкуренции оказывают влияние следующие важные факторы:

- необходимость постоянного повышения производительности труда и интенсификации производства;
- необходимость внедрения большого числа новых контролирующих систем и новых компонентов производства, автоматизации управления ими с помощью зарубежного ПО;
- усложнение технологии производственных процессов;
- усложнение систем управления обеспечивающими основные производственные процессы мероприятиями.

Перечисленные факторы говорят о том, что при интенсификации производственных процессов увеличивается количество пожароопасных зон, а значит растет опасность работы на всех участках объектов ТЭК. В связи с тем что при увеличении числа объектов, подлежащих контролю со стороны дежурной смены объекта ТЭК, ее состав остается неизменным, а численность персонала, обслуживающего объект ТЭК, растет медленнее, чем производство, необходимо применять новые, математически обоснованные методы поддержки управления, которые позволят адаптировать процессы к новым условиям обстановки [13, 14]. Следовательно, для сохранения текущих показателей эффективности деятельности ЛПР на объекте ТЭК по линии ПБ и ПВБ необходимо использовать дополнительные средства. Одним из вариантов их создания служат методы стратегического планирования.

Следует также отметить, что условия применения новых средств поддержки управления в настоящее время следует рассматривать несколько шире. Это связано прежде всего с затруднениями по сравнению с обычными условиями работы объектов ТЭК. Во многом данные условия, которые следует считать особыми, были сформированы введением

санкций. Основной причиной их появления следует считать сильную зависимость объектов ТЭК в Российской Федерации от новых иностранных технологий. Стоит обратить внимание на тот факт, что сегодня на предприятиях ТЭК в состав систем контроля и обеспечения пожарной безопасности входят элементы оборудования зарубежного производства [15, 16]. Так, например, соотношение российской и импортной продукции на внутреннем рынке автоматических пожарных сигнализаций (АПС) по итогам 2018 г. составило соответственно 75 и 25 % [17]. В целом отечественные аналоги зарубежных технологий либо находятся в разработке, либо вообще отсутствуют. В связи с этим на большом числе объектов ТЭК в РФ либо вовсе свернуты инвестиционные программы, либо ограничено применение уже введенных в эксплуатацию мощностей. Последнее обстоятельство связано, например, с необходимостью проведения ежеквартального аудита ПВБ по международным стандартам для публичных компаний, а также с вынужденным применением в системах обеспечения ПВБ технических решений зарубежного производства, совместимых с иностранным ПО “Индустрии 4.0”.

Новые вызовы, связанные с ограничениями особых условий, приводят к тому, что выполнение мероприятий по обеспечению ПВБ по ряду направлений на объектах ТЭК становится невозможным. Ввиду необходимости продолжительного поиска альтернатив или разработки аналогов по ряду позиций применяемой пожарной (противопожарной) техники время выполнения мероприятий по обеспечению ПВБ значительно превышает имеющийся у ЛПР резерв времени по управлению ситуацией.

Введенные санкции ограничили доступ к передовым технологиям, снизили доступность необходимых при их работе ресурсов и усилили негативные тенденции. Несмотря на довольно большие объемы финансирования создания российских аналогов иностранной продукции (согласно [18] в 2018 г. порядка 637,5 млрд руб.), программами по импортозамещению, принятыми и рассматриваемыми в соответствующих министерствах, производство многих элементов систем управления, которые были поставлены зарубежными производителями на объекты ТЭК вместе с новыми технологиями, не предусмотрено. Так, например, “доля импортных технологий и оборудования остается очень высокой в наиболее высокотехнологичных сегментах нефтегазовой отрасли: в технологиях производства сжиженного газа, программных средств для геологоразведки, бурения, добычи и переработки” [19].

В связи с этим недостаток соответствующих элементов технологий до их воспроизведения в РФ будет покрываться более напряженным проведе-

нием организационно-профилактических мероприятий при оперативном управлении конкретными объектами. Это уже само по себе означает, что в условиях интенсификации производства и процессов обеспечения безопасности (в первую очередь ПВБ) эффективность управления объектами ТЭК будет снижаться, так как будет превышено допустимое время реакции на изменения среды. Количественно время реакции для различных подсистем обеспечения ПВБ можно оценить путем сравнения скорости реакции автоматики со скоростью реакции человека. Однако это достаточно грубое (хотя и уместное) сравнение.

Вопросы повышения эффективности систем обеспечения ПВБ в особых условиях при планировании противопожарных мероприятий требуют серьезного анализа с учетом особых условий работы объектов ТЭК. Одним из решений указанной проблемы может служить анализ повышения качества комплексной защиты пожароопасных зон объектов ТЭК за счет совершенствования процессов предупреждения отказов (несвоевременности срабатывания) на оборудовании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Достижение такой цели возможно при совершенствовании планирования мероприятий с применением методов стратегического планирования. Для проработки основ применения аппарата стратегического планирования необходимо решить задачи, обеспечивающие совершенствование процесса поддержки управления мероприятиями ПВБ на объектах ТЭК в особых условиях.

Среди этих задач можно выделить задачи, связанные с разработкой ПО для указанной цели. Средства поддержки управления для ЛПР объекта ТЭК должны проводить опережающую аналитику. Алгоритмы расчета параметров моделей прогнозирования и предотвращения сложных ситуаций на объектах ТЭК с помощью математического аппарата стратегического планирования [20] следует включить в новый программно-аппаратный комплекс информационно-аналитической системы стратегического планирования (ИАССП) мероприятий по обеспечению ПВБ. В работе [21] приведено обоснование использова-

ния подобных ИАССП для своевременного и качественного проведения диагностики приборов информирования первого уровня АСУТП.

Разработка аппарата поддержки управления для преодоления тенденции снижения эффективности работы ЛПР на объектах ТЭК в особых условиях должна быть направлена на получение агрегатного показателя качества в многоуровневой последовательности решений и действий, динамически изменяемой для достижения нужного результата. Применяемую для этих целей ИАССП следует разрабатывать с учетом предложений, рассмотренных в [22, 23]. Исходя из опыта применения подобных средств в корпоративных информационных системах, широко используемых в качестве автоматизированных систем управления предприятиями, а также учитывая большой объем работ по созданию необходимого ПО, разработку ИАССП следует вести на основе стандартизованных процедур, ряд которых описан в [24, 25].

Заключение

Новые вызовы для топливно-энергетической промышленности связаны с необходимостью наращивания производственного потенциала, повышения уровня автоматизации технологических процессов, сохранения квалифицированных рабочих кадров в крайне нестабильных экономических условиях. Сегодня в результате интенсификации производства объем информации от средств накопления и передачи данных кратно растет и, как следствие, увеличивается число вероятных опасных ситуаций на производственных объектах ТЭК. В то же время количество сотрудников дежурных смен при этом остается на прежнем уровне. В результате этих процессов число ошибок при принятии решений ЛПР для различных подсистем ПВБ может увеличиваться.

Важно адаптировать подсистемы обеспечения ПВБ к новым особым условиям. Применение ИАССП для данных целей позволит значительно улучшить качество решений, принимаемых ЛПР на объектах ТЭК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dawoud S. M. Fire protection in the petroleum industry // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (November 11–14, 2007, Anaheim, California, USA). DOI: 10.2118/110521-ms.
2. Тагиев Р. М. Современные технологии противопожарной защиты на страже объектов ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. — 2014. — № S(712). — С. 70–73.
3. Kapitonov I. A., Voloshin V. I., Zhukovskaya I. V., Shulus A. A. Small and medium-sized enterprises as a driver of innovative development of the Russian fuel and energy complex // International Journal of Energy Economics and Policy. — 2017. — Vol. 7, No. 3. — P. 231–239.
4. Prakash J. Digital twins define oil & gas 4.0. URL: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (дата обращения: 21.02.2020).
5. Vaidya S., Ambad P., Bhosle S. Industry 4.0 — A glimpse // Procedia Manufacturing. — 2018. — Vol. 20. — P. 233–238. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.

6. Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O. Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, No. 25. — P. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002.
7. Головин С. Ю. Словарь практического психолога. — Минск : Харвест, 2007. — 976 с.
8. Анненков В. И., Барчан Н. Н., Мoiseев А. В., Киселев Б. И. Государственная служба: основы организации управленческой деятельности : учеб. пособие. — 2-е изд. — М. : КноРус, 2014. — 254 с.
9. Азрилиян А. Н., Азрилиян О. М., Калашикова Е. В., Квардакова О. Большой экономический словарь. — М. : Институт новой экономики, 2012. — 1472 с.
10. Grinyaev S. N., Medvedev D. A., Pravikov D. I., Samarin I. V., Sherbakov A. Yu. Problems and methods of creation of ultra-large information systems (as exemplified by the data of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography) // Asia Life Sciences — The Asian International Journal of Life Sciences. — 2019. — Supp. 21, No. 1. — P. 249–260.
11. Докторович А. Б. Формализованное описание и классификация социальных действий, взаимодействий и отношений // Пространство и Время. — 2011. — № 2(4). — С. 48–57.
12. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — 3-е изд., доп. — М. : Либроком, 2013. — 532 с.
13. Handscomb C., Sharabura S., Woxholth J. The oil and gas organization of the future. — September 2016. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-oil-and-gas-organization-of-the-future> (дата обращения: 25.02.2020).
14. Kovin R., Kudinov A., Markov N. G., Miroshnichenko E. Information technologies in industrial enterprises production assets management // Key Engineering Materials. — 2016. — Vol. 685. — P. 823–827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.685.823.
15. IRP 15: Snubbing Operations. An Industry Recommended Practice (IRP) for the canadian oil and gas industry. — May 2015. — Vol. 15. — 167 p. URL: <http://www.enform.ca/resources/download-resource.cfm?resourceId=25&type=pdf> (дата обращения: 21.02.2020).
16. Construction health and safety manual: oil refineries and petrochemical plants. URL: https://www.ihsa.ca/rtf/health_safety_manual/pdfs/locations/Oil_Refineries.pdf (дата обращения: 20.02.2020).
17. Структура рынка автоматических пожарных сигнализаций в РФ. URL: [https://prcs.ru/analytics-article/gynok-aps-\(avtomaticheskikh-pozharnyh-signalizacij\)](https://prcs.ru/analytics-article/gynok-aps-(avtomaticheskikh-pozharnyh-signalizacij)) (дата обращения: 21.02.2020).
18. Путину доложили цифры по импортозамещению, которые не смог сходу вспомнить Орешкин. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3946545> (дата обращения: 17.04.2020).
19. Охлопков А. Нефтегазовые компании распробовали импортозамещение // Guide “Тюменский нефтегазовый форум”. — 2018. — № 169. — С. 14–15. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3743355> (дата обращения: 07.02.2020).
20. Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2018. — № 4(293). — С. 143–154.
21. Samarin I. V., Strogonov A. Yu., Butuzov S. Yu. Evaluation model of integrated safety of fuel and energy complex facilities // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). — 2019. — Vol. 8, No. 5. — P. 2162–2167.
22. Крючков А. В. Моделирование возможных действий пользователя автоматизированной системы управления предприятием // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 1(59). — С. 145–149.
23. Крючков А. В. Обобщение опыта синтеза специального программного обеспечения на различных инструментальных средствах // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 3(61). — С. 252–263.
24. Крючков А. В. Проблемы стандартизации программного обеспечения и пути их возможного решения // Вопросы радиоэлектроники. — 2006. — № 1 (Т. 2). — С. 123–126.
25. Крючков А. В. Методология универсализации синтеза специального программного обеспечения крупной автоматизированной системы управления предприятием // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 3 (61). — С. 264–268.

REFERENCES

1. S. M. Dawoud. Fire protection in the petroleum industry. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (November 11–14, 2007, Anaheim, California, USA)*. DOI: 10.2118/110521-ms.

2. R. M. Tagiev. Modern technologies of fire protection on guard of objects of ACS “Gazprom”. *Gazovaya promyshlennost' / Gas Industry*, 2014, no. S(712), pp. 70–73 (in Russian).
3. I. A. Kapitonov, V. I. Voloshin, I. V. Zhukovskaya, A. A. Shulus. Small and medium-sized enterprises as a driver of innovative development of the Russian fuel and energy complex. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 231–239.
4. Prakash J. *Digital twins define oil & gas 4.0*. Available at: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (Accessed February 21, 2020).
5. S. Vaidya, P. Ambad, S. Bhosle. Industry 4.0 — A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 233–238. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
6. F. Zezulka, P. Marcon, I. Vesely, O. Sajdl. Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 25, pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002.
7. S. Yu. Golovin. *Slovar prakticheskogo psikhologa* [Dictionary of practical psychology]. Minsk, Harvest Publ., 2007. 976 p. (in Russian).
8. V. I. Annenkov, N. N. Barchan, A. V. Moiseev, B. I. Kiselev. *Gosudarstvennaya sluzhba. Osnovy organizatsii upravlencheskoy deyatel'nosti. Uchebnoye posobiye* [Public service. Fundamentals of management activity organization. Textbook]. 2nd ed. Moscow, Company KnoRus Publ., 2014. 254 p. (in Russian).
9. A. N. Azriliyan, O. M. Azriliyan, E. V. Kalashnikova, O. Kvardakova. *Bolshoy ekonomicheskii slovar* [Big economic dictionary]. Moscow, Institut novoy ekonomiki Publ., 2012. 1472 p. (in Russian).
10. S. N. Grinyaev, D. A. Medvedev, D. I. Pravikov, I. V. Samarin, A. Yu. Sherbakov. Problems and methods of creation of ultra-large information systems (as exemplified by the data of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography). *Asia Life Sciences — The Asian International Journal of Life Sciences*, 2019, supp. 21, no. 1, pp. 249–260.
11. A. B. Doktorovich. The formalized description and classification of social actions, interactions and relations. *Prostranstvo i vremya / Space and Time*, 2011, no. 2(4), pp. 48–57 (in Russian).
12. N. N. Moiseev. *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical tasks of the system analysis]. 3rd ed. Moscow, Librokom Publ., 2013. 532 p. (in Russian).
13. C. Handscomb, S. Sharabura, J. Woxholth. *The oil and gas organization of the future*. September 2016. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-oil-and-gas-organization-of-the-future> (Accessed February 25, 2020).
14. R. Kovin, A. Kudinov, N. G. Markov, E. Miroshnichenko. Information technologies in industrial enterprises production assets management. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 823–827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.685.823.
15. *IRP 15: Snubbing Operations. An Industry Recommended Practice (IRP) for the Canadian oil and gas industry*. May 2015, vol. 15. 167 p. Available at: <http://www.enform.ca/resources/download-resource.cfm?resourceId=25&type=pdf> (Accessed February 21, 2020).
16. *Construction health and safety manual: oil refineries and petrochemical plants*. Available at: https://www.ihsa.ca/rtf/health_safety_manual/pdfs/locations/OilRefineries.pdf (Accessed February 20, 2020).
17. *The structure of the market of automatic fire alarms in Russia* (in Russian). Available at: [https://prcs.ru/analytics-article/rynok-aps-\(avtomaticheskikh-pozharnykh-signalizatsij\)/](https://prcs.ru/analytics-article/rynok-aps-(avtomaticheskikh-pozharnykh-signalizatsij)/) (Accessed February 21, 2020).
18. *Putin was told the figures for import substitution, which Oreshkin could not immediately recall* (in Russian). Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3946545> (Accessed April 17, 2020).
19. A. Okhlopkov. Oil and gas companies have tried out import substitution. *Guide “Tyumenskiy neftegazovyy forum” / Guide “Tyumen Oil and Gas Forum”*, 2018, no. 169, pp. 14–15 (in Russian). Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3743355> (Accessed February 7, 2020).
20. I. V. Samarin, A. Yu. Stroganov. Model of evaluation of fire safety at fuel and energy complex facilities using temporal characteristics from graphs of strategic planning using automated control system. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina / Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2018, no. 4(293), pp. 143–154 (in Russian).
21. I. V. Samarin, A. Yu. Stroganov, S. Yu. Butuzov. Evaluation model of integrated safety of fuel and energy complex facilities. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 2162–2167.
22. A. V. Kruchkov. Modeling possible actions user of enterprise automation management systems. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 1(59), pp. 145–149 (in Russian).

23. A. V. Kruchkov. Summarizing the experience of synthesis special software for different programming languages. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 3(61), pp. 252–263 (in Russian).
24. A. V. Kruchkov. Problems of standardization of software and ways of their possible solutions. *Voprosy radioelektroniki / Questions of Radio Electronics*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 123–126 (in Russian).
25. A. V. Kruchkov. Universal application synthesis methodology of special software for large automated enterprise control system. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 3(61), pp. 264–268 (in Russian).

*Поступила 29.02.2020, после доработки 23.03.2020;
принята к публикации 01.04.2020*

*Received February 29, 2020; Received in revised form March 23, 2020;
Accepted April 4, 2020*

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ

© А. Ю. Андрияшкин^{1✉}, Е. О. Афанасьев², Е. Н. Кадочникова²

¹ Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ” им. Д. Ф. Устинова (Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1)

² Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

РЕЗЮМЕ

Введение. При тушении горящих твердых веществ использование воды из-за ее большого расхода и низкой изолирующей способности водяных пленок малоэффективно. В результате применения вязких гидрогелей в качестве огнетушащей жидкости снижается ее расход и образуется на горячей поверхности гидрогелевая пленка, имеющая по сравнению с водяной большую толщину и лучшую изолирующую способность.

Цели и задачи. Целью проведенного исследования являлось сравнение эффективности применения воды и вязких гидрогелей в качестве огнетушащих жидкостей при тушении твердых веществ. Решались следующие задачи: оценка влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей; определение влияния вязкости огнетушащей жидкости на толщину пленки и расход жидкости, стекающей с вертикальной стенки; количественное сравнение эффективности пожаротушения воды и различных гидрогелей по их расходу и по толщине пленки.

Методы. Проведен анализ влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей. Получено выражение для определения вязкости гидрогеля “Фаерсорб” в зависимости от концентрации полимерной добавки. Получены зависимости массы испарившегося гидрогеля “Фаерсорб” от времени при различной концентрации полимерной добавки. Дана оценка эффективности использования гидрогелей по их расходу и по толщине гидрогелевых пленок. Получена зависимость толщины пленки огнетушащей жидкости, стекающей с вертикальной стенки, от ее вязкости и плотности. Предложен коэффициент эффективности использования гидрогеля, который характеризует экономичность гидрогеля по его расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине. Проведен расчет эффективности использования гидрогелей различной вязкости по сравнению с водой.

Результаты и их обсуждение. Изменяя концентрацию гелеобразующей добавки, можно варьировать вязкость и испаряемость гидрогеля. Чем больше вязкость гидрогеля, стекающего с вертикальной стенки, тем толще гидрогелевая пленка и меньше его расход. По сравнению с водой эффективность использования гидрогелей в 2...4 раза выше.

Выводы. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о том, что применение вязких гидрогелей эффективно при тушении горящих твердых веществ.

Ключевые слова: огнетушащая жидкость; полимерные добавки; концентрация; вязкость жидкости; испарение жидкости; расход жидкости; гидрогелевая пленка.

Для цитирования: Андрияшкин А. Ю., Афанасьев Е. О., Кадочникова Е. Н. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 53–62. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.53-62.

✉ Александр Юрьевич Андрияшкин, e-mail: sascha1a@mail.ru

Effectiveness of viscous hydrogel in extinguishing burning solid substances

© Alexander Yu. Andryushkin^{1✉}, Eugene O. Afanasiev², Elena N. Kadochnikova²

¹ Baltic State Technical University “VOENMEH” (1-ya Krasnoarmeyskaya St., 1, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

² Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. When extinguishing burning solids, the use of water due to its high consumption and low insulating capacity of water films is ineffective. As a result of using viscous hydrogels as a fire extinguishing liquid, its consumption is reduced and a hydrogel film is formed on the burning surface, which has a greater thickness and better insulating ability compared to water.

Aims and purposes. The aim of this study was to compare the effectiveness of using water and viscous hydrogels as a fire extinguishing liquid in the extinguishing of solid substances. The following tasks were solved: assessment of the impact of the concentration of gelling additives on the viscosity and evaporation of hydrogels; determination of the effect of viscosity of the fire extinguishing liquid film thickness and flow rate of liquid flowing from a vertical wall; a quantitative comparison of the effectiveness of fire suppression water, and various hydrogels according to their flow rate and film thickness.

Methods. The influence of the concentration of gel-forming additives on the viscosity and evaporation of hydrogels was analyzed. An expression is obtained for the viscosity of the “Firesorb” hydrogel depending on the concentration of the polymer additive. The dependences of the evaporated mass of the hydrogel “Firesorb” from time to time at different concentrations of polymer additives. Evaluate the effectiveness of the use of hydrogels in their consumption and the thickness of the hydrogel films. The dependence of the film thickness of the extinguishing liquid flowing from the vertical wall on its viscosity and density is obtained. The coefficient of efficiency of hydrogel use is proposed, which characterizes the efficiency of hydrogel by its consumption and the insulating ability of the hydrogel film by its thickness. The efficiency of using hydrogels of different viscosities in comparison with water is calculated.

Results and discussion. By changing the concentration of the gel-forming additive, you can vary the viscosity and evaporation of the hydrogel. The higher the viscosity of the hydrogel flowing from the vertical wall, the thicker the hydrogel film and less its consumption. Compared with water, the efficiency of using hydrogels is 2...4 times higher.

Conclusions. The results obtained during the study indicate that the use of viscous hydrogels is effective in extinguishing burning solids.

Keywords: fire extinguishing liquid; polymer additives; concentration; liquid viscosity; liquid evaporation; liquid consumption; hydrogel film.

For citation: A. Yu. Andryushkin, E. O. Afanasiev, E. N. Kadochnikova. Effectiveness of viscous hydrogel in extinguishing burning solid substances. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 53–62 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.53-62.

✉ Alexander Yuryevich Andryushkin, e-mail: sascha1a@mail.ru

Введение

Для ликвидации пожаров класса А, т. е. для тушения горящих твердых веществ, чаще всего используют воду, что обусловлено ее свойствами (плотность 1000 кг/м^3 ; динамическая вязкость $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$; удельная теплоемкость $4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; поверхностное натяжение $0,072 \text{ Н/м}$). Основным огнетушащим свойством воды является способность охлаждать горящие материалы за счет своей высокой удельной теплоемкости. В то же время применение воды для ликвидации возгораний твердых материалов имеет ряд существенных недостатков. Из-за низкой вязкости вода на горящих поверхностях образует тонкие пленки, которые очень слабо изолируют поверхность от воздействия пламени и от доступа кислорода из окружающей среды. Вследствие высокого поверхностного натяжения и низкой вязкости воды пленки быстро стекают с наклонных поверхностей, за короткое время разрушаются и испаряются. Обычно толщина водяной пленки составляет $\delta < 0,2 \text{ мм}$ [1, 2].

Этими недостатками обуславливается существенно низкая эффективность тушения пожаров водой. Непосредственно на тушение самого очага возгорания используется до 10 % расходуемой воды, остальные 90 % тратятся бесполезно, поэтому для ощутимого воздействия на пожар вынужденно увеличивают ее расход, что приводит к потере большого объема воды. В некоторых случаях ущерб от пролитой воды превышает ущерб от самого пожара, поэтому проблема повышения эффективности ее использования при тушении пожаров весьма актуальна [3–8].

Основным направлением повышения эффективности использования воды на пожарах является применение вязких огнетушащих жидкостей. Вязкая огнетушащая жидкость чаще всего представляет собой гидрогель — структурированную дисперсную систему, состоящую из высокомолекулярного компонента, образующего дисперсную фазу, и низкомолекулярного компонента, образующего дисперсионную среду. В гидрогеле частицы дисперсной фазы взаимодействуют друг с другом и формируют пространственную макромолекулярную структурную сетку (каркас), из-за наличия которой дисперсионная среда (вода) лишается подвижности и сосредотачивается в ячейках структурной сетки (рис. 1). Именно этим обуславливается повышение вязкости гидрогеля.

Для получения гидрогелей используют различные по своему составу неорганические и органические

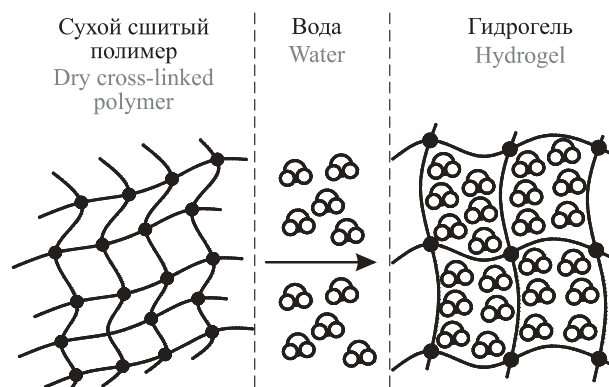


Рис. 1. Образование гидрогеля

Fig. 1. The formation of hydrogel

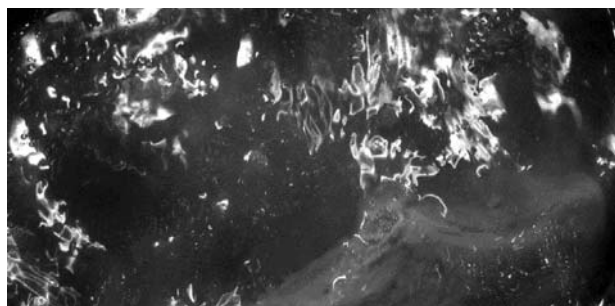


Рис. 2. Поверхность стекающей гидрогелевой пленки

Fig. 2. Surface of the flowing hydrogel film

ские добавки, которые при взаимодействии с водой набухают (степень набухания может достигать до 600 %) и формируют структурную сетку гидрогеля. Гидрогели способны поглощать и удерживать значительное количество воды — до 2 кг на 1 г сухой добавки. Обладая высокой вязкостью, они образуют толстую пленку, покрывающую горящие поверхности и тем самым изолирующую их от источника нагрева и от доступа кислорода (рис. 2) [9–14].

Эффективность огнетушащей жидкости чаще всего оценивают по количественным показателям — расходу, интенсивности подачи или времени, необходимому для тушения модельного очага пожара. Чем меньше количественные показатели для конкретной огнетушащей жидкости, тем выше ее эффективность пожаротушения.

Целью проведенного исследования являлось сравнение эффективности применения воды и вязких гидрогелей в качестве огнетушащих жидкостей при тушении твердых веществ.

Для достижения цели исследования были сформулированы следующие задачи:

- 1) оценка влияния концентрации гелеобразующих добавок на вязкость и испарение гидрогелей;
- 2) определение влияния вязкости огнетушащей жидкости на толщину пленки и расход этой жидкости, стекающей с вертикальной стенки;
- 3) количественное сравнение эффективности пожаротушения воды и различных гидрогелей по их расходу и по толщине пленки.

Свойства используемых при пожаротушении гидрогелей

Вязкость гидрогелей. В целях уменьшения расхода воды при пожаротушении с помощью гидрогелей были опробованы различные гелеобразующие добавки. Рассмотрим хорошо показавшие себя гелеобразующие добавки и влияние их концентрации на вязкость гидрогелей [15–18].

Для повышения вязкости воды используют неорганические добавки, в частности бентонит — природный глинистый минерал, гидроалюмосиликат, обладающий свойством набухать при гидратации в

Таблица 1. Зависимость вязкости и плотности гидрогеля от концентрации бентонита [19]

Table 1. Dependence of hydrogel viscosity and density on bentonite concentration [19]

Концентрация бентонита c_d , % Concentration of bentonite c_{add} , %	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Динамическая вязкость η , Па·с Dynamic viscosity η , Pa·s	Кинематическая вязкость ν , м ² /с Kinematic viscosity ν , m ² /s
5	1010	0,0103	$10,197 \cdot 10^{-6}$
8	1025	0,0186	$18,135 \cdot 10^{-6}$
10	1042	0,0273	$26,207 \cdot 10^{-6}$
15	1075	0,4427	$411,73 \cdot 10^{-6}$

η , Па·с / η , Pa·sec

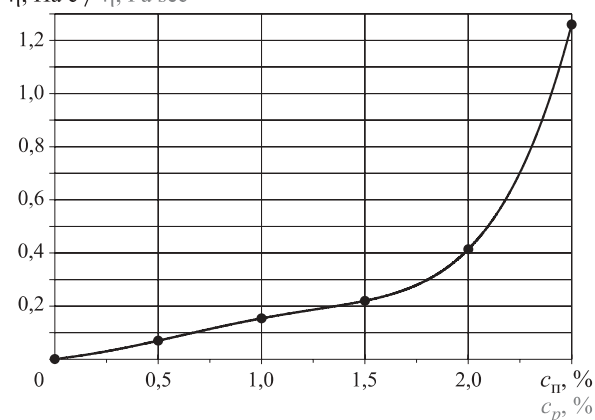


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости гидрогеля η от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” c_p [20]

Fig. 3. Dependence of the dynamic viscosity of the hydrogel η the concentration of polymer additives “Firesorb” c_p [20]

14–16 раз. В результате гидратации, т. е. при присоединении молекулами бентонита молекул воды, формируется вязкий гидрогель. Вязкость гидрогеля сильно зависит от концентрации бентонита c_d , который образует структурную сетку, удерживающую молекулы воды (табл. 1) [19].

Перспективно для формирования гидрогелей применять полимерные добавки, например полиакриламиды. Полимерная добавка мгновенно набухает, достигая своей полной сорбционной способности. Процесс формирования гидрогеля длится в течение нескольких секунд. Рекомендуемая концентрация широко применяемой полимерной добавки “Фаерсорб” составляет $c_p = 1,0 \dots 2,5$ %. Полимерная добавка “Фаерсорб” представляет собой дисперсный раствор полиакрилата натрия со стабилизирующими добавками. Гидрогель при концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” $c_p = 1$ % имеет следующие показатели (при 20 °C): $\nu = 140 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho = 1100$ кг/м³; поверхностное натяжение 33,4 мН/м (рис. 3) [20].

Зависимость динамической вязкости гидрогеля η от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” c_n (см. рис. 1) описывается полиномиальным уравнением регрессии:

$$\eta = 0,0017c_n^5 - 0,0174c_n^4 + 0,0609c_n^3 - 0,0716c_n^2 + 0,0675c_n - 0,04. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что вязкость гидрогеля при концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n < 1,0\%$ остается низкой, поэтому гидрогель может проникать в поры и пустоты горящей поверхности. При повышении концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” до $2,0\%$ вязкость гидрогеля увеличивается, снижается его текучесть и толщина гидрогелевой пленки на горящей поверхности растет. При концентрации полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n > 2,0\%$ гидрогель становится весьма вязким, толщина гидрогелевой пленки — значительной, и она может использоваться для долговременной защиты конструктивных элементов от воздействия высоких температур.

Испаряемость гидрогелей. Вязкий гидрогель создает толстую защитную пленку на поверхности горящих твердых материалов. Гидрогелевая пленка состоит на $95\text{--}99\%$ из воды и поэтому имеет высокую охлаждающую способность. Чем больше концентрация полимерной добавки “Фаерсорб” в гидрогеле, тем в меньшей степени он испаряется при высоких температурах (рис. 4) [20, 21]. Зависимость массы испарившейся жидкости $m_{и.ж}$ (г) от времени при температуре 150°C описывается полиномиальным уравнением регрессии:

- для воды:

$$m_{и.ж} = 1 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 0,0059 \tau^2 + 1,3094 \tau - 4,038; \quad (2)$$

- для гидрогеля с содержанием полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n = 1\%$:

$$m_{и.ж} = 8 \cdot 10^{-6} \tau^3 - 0,0041 \tau^2 + 1,0649 \tau - 3,4436; \quad (3)$$

- для гидрогеля с содержанием полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n = 3\%$:

$$m_{и.ж} = 7 \cdot 10^{-6} \tau^3 - 0,0032 \tau^2 + 0,841 \tau - 3,1625, \quad (4)$$

где τ — время, мин.

Анализ выражений (2)–(4) показывает, что с увеличением концентрации полимерной добавки испарение жидкости с поверхности гидрогеля уменьшается. Чем выше содержание полимерной добавки в гидрогеле, тем больше времени требуется на его испарение.

Испарение гидрогеля происходит с поверхности, обращенной к огню. Толщина гидрогелевой пленки может достигать нескольких миллиметров, что значительно больше по сравнению с водяной пленкой, поэтому изолирующая способность гидрогелевой

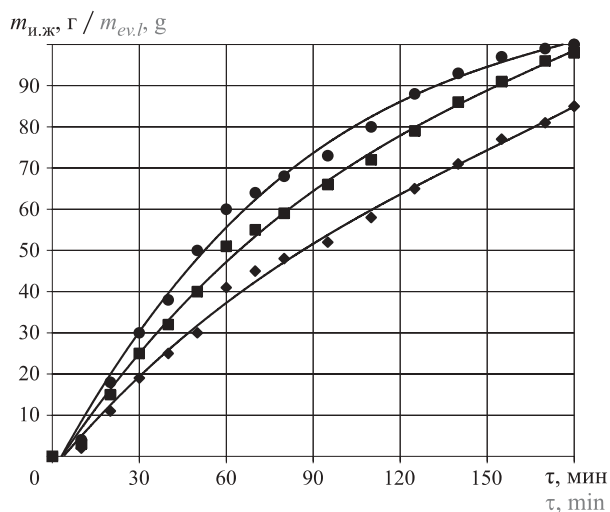


Рис. 4. Зависимость массы испарившейся жидкости $m_{и.ж}$ от времени τ при температуре 150°C при одинаковом объеме жидкости и площади поверхности испарения: ● — вода; ■ — гидрогель с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n = 1\%$; ◆ — то же, $c_n = 3\%$

Fig. 4. Dependence of the mass of evaporated liquid $m_{ev,l}$ from time τ at a temperature of 150°C , for the same liquid volume and surface area evaporation: ● — water; ■ — hydrogel with the concentration of polymer additives “Firesorb” $c_p = 1\%$; ◆ — the same, $c_p = 3\%$

пленки на поверхности горящих твердых материалов будет в несколько раз выше. Поверхностные слои гидрогелевой пленки, близко расположенные к огню, нагреваются до 100°C , а нижележащие слои имеют температуру ниже 100°C . В связи с этим в гидрогелевой пленке по ее толщине возникает существенный температурный градиент, что свидетельствует о высокой защитной способности гидрогеля. Повышение температуры защищаемой поверхности происходит только тогда, когда большая часть гидрогелевой пленки испарится, ее толщина уменьшится и температурный градиент станет незначительным.

Таким образом, концентрация гелеобразующей добавки существенно влияет на его вязкость, от которой в свою очередь зависит толщина гидрогелевой пленки на горящей поверхности. Чем выше вязкость гидрогеля, тем дольше он испаряется при воздействии высокой температуры и тем выше изолирующая способность гидрогелевой пленки.

Оценка эффективности использования гидрогелей по их расходу и по толщине гидрогелевых пленок

В зависимости от условий применения расход воды при тушении пожаров класса А по сравнению с гидрогелем больше в $1,5\text{--}10,0$ раз. Толщина гидрогелевой пленки, формирующейся на горящих поверхностях, в несколько раз больше толщины водяной пленки. Учитывая такой большой разброс по рас-

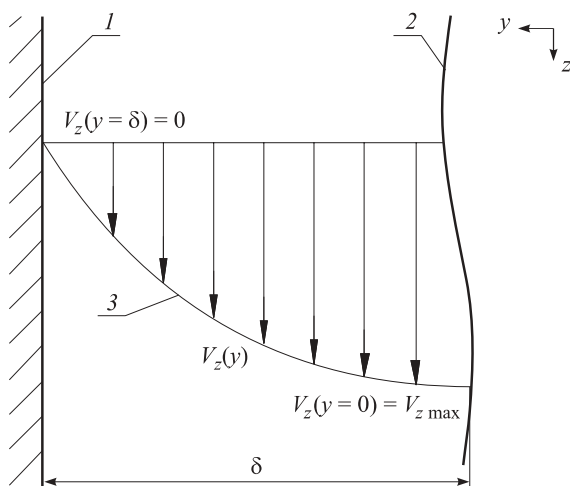


Рис. 5. Распределение скоростей по толщине гидрогелевой пленки: 1 — вертикальная стенка; 2 — свободная поверхность стекающей гидрогелевой пленки; 3 — профиль скоростей по толщине гидрогелевой пленки; δ — толщина гидрогелевой пленки; V_z — скорость гидрогелевой пленки вдоль оси z ; y — ось, направленная в сторону уменьшения скорости, перпендикулярно стенке; z — ось, направленная в сторону стекания гидрогелевой пленки

Fig. 5. Distribution of velocities along the thickness of the hydrogel film: 1 — vertical wall; 2 — free surface of the flowing hydrogel film; 3 — velocity profile along the thickness of the hydrogel film; δ — thickness of the hydrogel film; V_z — speed of the hydrogel film along the z axis; y — axis directed towards the decrease in speed, perpendicular to the wall; z — axis directed

ходу воды и гидрогеля, а также по толщине водяной и гидрогелевой пленок, количественно оценим влияние концентрации различных гелеобразующих добавок на эффективность использования гидрогелей по сравнению с водой [22].

Оценим расход гидрогеля при его ламинарном стекании с вертикальной стенки в виде пленки шириной b (рис. 5). При ламинарном режиме течения частицы жидкости перемещаются только вдоль оси z .

В результате совместного решения уравнения Навье – Стокса для одномерного установившегося потока (вдоль оси z) с уравнением неразрывности потока получим выражения для определения скорости течения гидрогелевой пленки [23, 24]:

$$V_z(y) = \frac{\rho g \delta^2}{2\eta} \left(1 - \frac{y^2}{\delta^2} \right), \quad (5)$$

где $V_z(y)$ — скорость гидрогелевой пленки на расстоянии y от ее свободной поверхности, м/с;
 g — ускорение свободного падения, м/с²;
 $g = 9,81$ м/с²;
 y — координата оси, направленная в сторону уменьшения скорости, перпендикулярно стенке, м.

Из выражения (5) видно, что скорость по сечению свободной гидрогелевой пленки изменяется по параболе, максимальная скорость течения достигается у свободной поверхности пленки.

Среднюю скорость гидрогелевой пленки можно найти из выражения [23, 24]:

$$V_{z \text{ ср}} = \frac{\rho g \delta^2}{3\eta}, \quad (6)$$

где $V_{z \text{ ср}}$ — средняя скорость гидрогелевой пленки, стекающей с вертикальной стенки, м/с.

Объемный расход стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки Q (м³/с) можно определить из выражения [23, 24]:

$$Q = V_{z \text{ ср}} b \delta, \quad (7)$$

где b — ширина стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки, м.

Толщину стекающей с вертикальной стенки гидрогелевой пленки можно определить из выражения (5) с учетом (7) [23, 24]:

$$\delta = \left(\frac{3Q\eta}{b\rho g} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Расход гидрогеля, подаваемого на вертикальную стенку через отверстие пожарного ствола диаметром $d_{\text{отв}}$ (м) можно рассчитать из выражения [23, 24]:

$$Q = \mu (0,25\pi d_{\text{отв}}^2) \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

где p — давление подачи гидрогеля, Па;

μ — коэффициент расхода.

Примем допущение, что объемный расход стекающей по вертикальной стенке гидрогелевой пленки равен расходу гидрогеля, подаваемого на вертикальную стенку через отверстие диаметром $d_{\text{отв}}$.

Тогда по выражению (8) с учетом (9) можно рассчитать толщину стекающей с вертикальной стенки гидрогелевой пленки:

$$\delta = \left(\frac{3\eta\mu (0,25\pi d_{\text{отв}}^2) (2p)^{0,5}}{b\rho^{1,5}g} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

При количественной оценке эффективности использования гидрогеля примем за базовое значение толщину стекающей водяной пленки δ_b (м) и объемный расход воды Q_b (м³/с). Сравним с базовыми значениями для воды объемный расход гидрогеля и толщину гидрогелевой пленки в одинаковых условиях. Чем меньше объемный расход гидрогеля Q по отношению к объемному расходу воды Q_b и чем больше толщина гидрогелевой пленки δ по отношению к толщине водяной пленки δ_b , тем выше эффективность использования гидрогеля.

Для количественной оценки эффективности использования гидрогеля предложен коэффициент $K_{\text{эф}}$:

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_b}{Q} \frac{\delta}{\delta_b}. \quad (11)$$

Таблица 2. Эффективность использования воды и гидрогелей / Table 2. Water and hydrogel efficiency

Параметр Parameter	Вода Water	Гидрогель с добавкой “Фаерсорб” Hydrogel with additive “Firesorb”		Гидрогель с бентонитом $c_d = 5\%$ Hydrogel with bentonite $c_{add} = 5\%$
		$c_n = 1\%$ $c_p = 1\%$	$c_n = 2\%$ $c_p = 2\%$	
Толщина пленки δ , мм / Film thickness δ , mm	0,135	1,330	5,355	2,926
Скорость течения $V_{z\text{cp}}$, м/с / Flow rate $V_{z\text{av}}$, m/sec	5,97	5,79	1,44	2,75
Объемный расход жидкости в стекающей пленке Q , м ³ /с Volumetric flow rate of liquid in the flowing film Q , m ³ /sec	$8,07 \cdot 10^{-3}$	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$8,03 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент эффективности использования гидрогеля $K_{\text{эф}}$ The efficiency of hydrogel K_{ef}	1,00	1,03	4,16	2,18

Коэффициент эффективности использования гидрогеля $K_{\text{эф}}$ одновременно характеризует его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине.

Для оценки эффективности использования гидрогеля по его расходу и по толщине гидрогелевых пленок используются следующие выражения: для определения толщины пленки — (10); для определения средней скорости течения и объемного расхода на вертикальной стенке — (6) и (7); для расчета коэффициента эффективности использования гидрогеля — (11). При расчете примем, что подачу воды или гидрогеля осуществляют из пожарного ручного ствола РС-70, имеющего следующие характеристики: давление подачи жидкости $p = 0,5$ МПа; диаметр отверстия подачи жидкости $d_{\text{отв}} = 0,019$ м; коэффициент расхода $\mu = 0,9$. Примем допущение, что на вертикальной стенке формируется пленка жидкости шириной $b = 1$ м.

Количественно оценим эффективность использования гидрогелей с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n = 1\%$ и $c_n = 2\%$, а также с концентрацией бентонита $c_d = 5\%$ (табл. 2).

Анализ результатов расчета (см. табл. 2) показал, что с ростом концентрации гелеобразующей добавки c_n скорость стекания гидрогелевой пленки по вертикальной стенке значительно уменьшается, при этом существенно возрастает ее толщина, поэтому объемный расход гидрогеля остается примерно одинаковым. Коэффициент $K_{\text{эф}}$ увеличивается при росте толщины гидрогелевой пленки и при снижении скорости ее стекания с вертикальной стенки. Расчеты показали, что эффективность использования вязких гидрогелей по сравнению с водой в несколько раз больше: для гидрогелей $K_{\text{эф}} = 2,0 \dots 4,2$, а для воды $K_{\text{эф}} = 1,0$. При тушении пожаров класса А эффективность пожаротушения низковязкими гидрогелями и водой примерно одинакова.

Результаты и их обсуждение

При ликвидации пожаров класса А традиционно используется вода, но ее эффективность как огнетушащей жидкости мала, поскольку на тушение затрачивается большой объем воды, что обусловлено ее низкой вязкостью. Перспективным направлением в повышении эффективности использования воды при тушении горящих твердых веществ является применение гидрогелей, содержащих 95–99 % воды. Гидрогели получают введением в воду гелеобразующих добавок, которые при взаимодействии с ней набухают и формируют структурированную систему с пространственной структурной сеткой, удерживающей воду. Кроме того, образующиеся на горящих поверхностях гидрогелевые пленки имеют большую толщину и надежно защищают их от источника нагрева и доступа кислорода.

Обобщены экспериментальные данные по влиянию концентрации гелеобразующих добавок на свойства гидрогелей. Получена эмпирическая зависимость вязкости гидрогеля от концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”. Анализ зависимости показывает, что с ростом концентрации полимерной добавки вязкость гидрогеля резко возрастает. Получены также эмпирические зависимости массы испарившейся жидкости от времени при 150 °С для воды, гидрогеля с концентрацией полимерной добавки “Фаерсорб” $c_n = 1\%$ и $c_n = 3\%$. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением концентрации полимерной добавки “Фаерсорб”, т. е. с ростом вязкости, масса испарившегося гидрогеля значительно уменьшается. Таким образом, варьируя концентрацией гелеобразующей добавки, можно существенно менять вязкость гидрогеля, придавая ему необходимый комплекс свойств.

Проведена сравнительная оценка эффективности использования гидрогелей и воды по их расходу и по толщине гидрогелевых и водяных пленок. Получена зависимость толщины гидрогелевой пленки на вертикальной стенке от расхода гидрогеля, подава-

емого на эту стенку, с учетом его вязкости и плотности. Предложен коэффициент эффективности использования гидрогеля, характеризующий его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине. Проведена сравнительная оценка эффективности использования различных гидрогелей по расходу и по толщине гидрогелевых пленок при тушении из пожарного ручного ствола РС-70. Установлено, что по сравнению с водой ($K_{эф} = 1,0$) эффективность использования вязких гидрогелей в несколько раз больше ($K_{эф} = 2,0 \dots 4,2$).

Таким образом, применение вязких гидрогелей является эффективным при тушении пожаров класса А и позволяет существенно снизить расход воды.

Выводы

1. Причиной низкой эффективности воды при тушении пожаров класса А является ее большой расход, обусловленный низкой вязкостью.
2. Повышение эффективности использования воды при тушении пожаров связано с применением

вязких гидрогелей с большим содержанием воды. Толстые гидрогелевые пленки надежно изолируют горящие поверхности от источника нагрева и доступа кислорода.

3. Для формирования вязких гидрогелей используют различные неорганические и органические добавки, адсорбирующие воду. Вязкость гидрогеля изменяется в широких пределах в зависимости от концентрации гелеобразующей добавки.

4. С течением времени при высокой температуре масса испарившегося гидрогеля уменьшается с ростом его вязкости.

5. Для количественной оценки эффективности использования гидрогеля введен коэффициент эффективности, характеризующий его экономичность по расходу и изолирующую способность гидрогелевой пленки по ее толщине.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения в качестве огнетушащей жидкости вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rasbash D. J.* The extinction of fire with plain water: a review // *Fire Safety Science*. — 1986. — Vol. 1. — P. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
2. *Nolan D. P.* Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. — 2nd ed. — Elsevier Inc., 2011. — 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5.
3. *Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A.* Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station // 42nd International Conference on Environmental Systems. San Diego, California : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012. — P. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
4. *Rodriguez B., Young G.* Development of the International space station fine water mist portable fire extinguisher // 43rd International Conference on Environmental Systems. — Vail, CO : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. — P. 1–13. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
5. *Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T.* On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires // *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. — Orlando, USA : National Fire and Protection Association, 2007. — P. 217–223.
6. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2012. — № 1(21). — С. 64–69.
7. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2012. — № 1. — С. 53–58.
8. *Войтков И. С., Волков Р. С., Высокоморная О. В., Жданова А. О.* Экспериментальное исследование процессов тушения модельных очагов пожара распределенными во времени и пространстве капельными потоками воды // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 56–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.
9. *Huang Y., Zhang W., Dai X., Zhao Y.* Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties // *Procedia Engineering*. — 2012. — Vol. 45. — P. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
10. *Contreras M. D., Sánchez R.* Application of a factorial design to the study of specific parameters of a Carbopol ETD 2020 gel. Part I. Viscoelastic parameters // *International Journal of Pharmaceutics*. — 2002. — Vol. 234, No. 1-2. — P. 139–147. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00953-X.
11. *Hernández M. J., Pellicer J., Delegido J., Dolz M.* Rheological characterization of easy-to-disperse (ETD) Carbopol hydrogels // *Journal of Dispersion Science and Technology*. — 1998. — Vol. 19, No. 1. — P. 31–42. DOI: 10.1080/01932699808913159.

12. Tichý E., Murányi A., Pšenková J. The effects of moist heat sterilization process and the presence of electrolytes on rheological and textural properties of hydrophilic dispersions of polymers-hydrogels // *Advances in Polymer Technology*. — 2015. — Vol. 35, No. 2. — P. 198–207. DOI: 10.1002/adv.21543.
13. Oppong F. K., Rubatat L., Frisken B. J., Bailey A. E., de Bruyn J. R. Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel // *Physical Review E*. — 2006. — Vol. 73, No. 4. — P. 401–405. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.041405.
14. Савченко А. В., Островерх О. А., Холодный А. С. Теоретическое обоснование использования гелеобразующих систем для охлаждения стенок резервуаров и цистерн с углеводородами от теплового воздействия пожара // *Проблемы пожарной безопасности* : сб. науч. тр. — 2015. — № 37. — С. 191–195.
15. Андрияшкин А. Ю., Коньшев М. В., Охапкин М. В. Определение параметров вязкопластического течения полимерной композиции в технологической оснастке при формировании покрытия // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. — 2017. — № 11-12(113-114). — С. 76–81.
16. Андрияшкин А. Ю., Михеенков М. Ю., Цой А. А. Теоретические аспекты нанесения полимерных покрытий на нефтеперерабатывающее оборудование // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2017. — № 1. — С. 53–59. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00032.
17. Андрияшкин А. Ю., Михеенков М. Ю., Цой А. А. Оценка вязкости композиций при формировании полимерных покрытий на нефтеперерабатывающем оборудовании // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2017. — № 1(41). — С. 72–79.
18. Андрияшкин А. Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением : монография. — СПб. : БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. — 400 с.
19. Копылов Н. П., Москвилев Е. А., Федоткин Д. В., Стрижак П. А. Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // *Лесотехнический журнал*. — 2016. — Т. 6, № 4(24). — С. 62–67.
20. Лобанов Ф. И. Использование полимерных материалов в пожаротушении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2004. — Т. 13, № 1. — С. 64–68.
21. De Gennes P. G. Wetting: statics and dynamics // *Reviews of Modern Physics*. — 1985. — Vol. 57, No. 3. — P. 827–863. DOI: 10.1103/RevModPhys.57.827.
22. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.
23. Иваняков С. В., Коньгин С. Б., Крючков Д. А. Гидродинамика аппаратов со свободно стекающей пленкой жидкости : уч.-метод. пособие. — Самара : Самарский государственный технический университет, 2007. — 24 с.
24. Кутепов А. М., Полянин А. Д., Запryanов З. Д., Вязьмин А. В., Казенин Д. А. Химическая гидродинамика : справ. пособие. — М. : Квантум, 1996. — 336 с.

REFERENCES

1. D. J. Rasbash. The extinction of fire with plain water: a review. *Fire Safety Science*, 1986, vol. 1, pp. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
2. D. P. Nolan. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities*. 2nd ed. Elsevier, Inc., 2011. 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5.
3. T. Carriere, J. R. Butz, S. Naha, A. Brewer, A. Abbud-Madrid. Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station. In: *42nd International Conference on Environmental Systems*. USA, California, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012, pp. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
4. B. Rodriguez, G. Young. Development of the International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. In: *43rd International Conference on Environmental Systems*. Vail, CO, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013, pp. 1–13. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
5. A. Abbud-Madrid, D. Watson, J. T. McKinnon. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. In: *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. USA, Orlando, National Fire and Protection Association, 2007, pp. 217–223.

6. A. Yu. Andryushkin, M. T. Peleh. Efficiency of the stewing fire by sprayed water. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2012, no. 1(21), pp. 64–69 (in Russian).
7. A. Yu. Andryushkin, M. T. Peleh. Reception of the small drop of water by gas spraying. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2012, no. 1, pp. 53–58 (in Russian).
8. I. S. Voytkov, R. S. Volkov, O. V. Vysokomornaya, A. O. Zhdanova. Experimental study of model fire seats extinguishing by the distributed in time and space water droplet flows. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 56–65 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.
9. Y. Huang, W. Zhang, X. Dai, Y. Zhao. Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
10. M. D. Contreras, R. Sánchez. Application of a factorial design to the study of specific parameters of a Carbopol ETD 2020 gel. Part I. Viscoelastic parameters. *International Journal of Pharmaceutics*, 2002, vol. 234, no. 1-2, pp. 139–147. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00953-X.
11. M. J. Hernández, J. Pellicer, J. Delegido, M. Dolz. Rheological characterization of easy-to-disperse (ETD) Carbopol hydrogels. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1998, vol. 19, no. 1, pp. 31–42. DOI: 10.1080/01932699808913159.
12. E. Tichý, A. Murányi, J. Pšenková. The effects of moist heat sterilization process and the presence of electrolytes on rheological and textural properties of hydrophilic dispersions of polymers-hydrogels. *Advances in Polymer Technology*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 198–207. DOI: 10.1002/adv.21543.
13. F. K. Oppong, L. Rubatat, B. J. Frisken, A. E. Bailey, J. R. de Bruyn. Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel. *Physical Review E*, 2006, vol. 73, no. 4, pp. 401–405. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.041405.
14. A. V. Savchenko, O. A. Ostroverh, A. S. Kholodny. Theoretical basis gelling cooling systems tank walls and tanks hydrocarbons against heat fire. In: *Problemy pozharnoy bezопасnosti* [Problems of Fire Safety]. Collection of Scientific Works, 2015, no. 37, pp. 191–195 (in Russian).
15. A. Yu. Andryushkin, M. V. Konyshev, M. V. Ohapkin. Determination parameter plastic current to polymeric composition in technological rig when shaping the covering. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu / Military Enginery. Issue 16. Counter-terrorism technical devices*, 2017, no. 11-12(113-114), pp. 76–81 (in Russian).
16. A. Yu. Andryushkin, M. Yu. Miheenkoy, A. A. Tsoy. Theoretical aspects of the fixing polymeric covering on equipment for oil. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Bulletin of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 1, pp. 53–59. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00032.
17. A. Yu. Andryushkin, M. Yu. Miheenkoy, A. A. Tsoy. Estimation to viscosity composition when shaping polymeric covering on equipment for oil. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2017, no. 1(41), pp. 72–79 (in Russian).
18. A. Yu. Andryushkin. *Formirovaniye dispersnykh sistem sverkhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniyem* [Forming of dispersed systems with supersonic gas-dynamic spray]. Monograph. Saint Petersburg, BGTU “VOENMEKH”, 2012. 400 p. (in Russian).
19. N. P. Kopylov, E. A. Moskvilin, D. V. Fedotkin, P. A. Strizhak. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires efficiency extinguish using aviation. *Lesotekhnicheskij zhurnal / Forestry Engineering Journal*, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 62–67 (in Russian).
20. F. I. Lobanov. Utilization of polymer materials in fire extinguishing process. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 64–68 (in Russian).
21. P. G. de Gennes. Wetting: statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 1985, vol. 57, no. 3, pp. 827–863. DOI: 10.1103/RevModPhys.57.827.
22. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 66–76 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.
23. S. V. Ivanyakov, S. B. Konygin, D. A. Kryuchkov. *Gidrodinamika apparatov so svobodno stekayushchey plenкой zhidkosti* [Hydrodynamics equipment with a liquid film moving under the effect of gravity]. Study reference manual. Samara, Samara State Technical University Publ., 2007. 24 p. (in Russian).

24. A. M. Kutepov, A. D. Polyanin, Z. D. Zapryanov, A. V. Vyazmin, D. A. Kazenin. *Khimicheskaya gidrodinamika* [Chemical hydrodynamics]. Reference manual. Moscow, Kvantum Publ., 1996. 336 p. (in Russian).

*Поступила 21.12.2019, после доработки 19.03.2020;
принята к публикации 02.04.2020*

*Received December 21, 2019; Received in revised form March 19, 2020;
Accepted April 2, 2020*

Информация об авторах

АНДРЮШКИН Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой “Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники”, Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ” им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

АФАНАСЬЕВ Евгений Олегович, преподаватель кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2790-3763; e-mail: jenya_a@list.ru

КАДОЧНИКОВА Елена Николаевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru

Information about the authors

Alexander Yu. ANDRYUSHKIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Department of “The Technology of Structural Materials and Production of Rocket and Space Technology”, Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

Eugene O. AFANASIEV, Physics Educator Faculty of “Physics and Technology Basis of Maintaining Fire Safety”, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2790-3763; e-mail: jenya_a@list.ru

Elena N. KADOCHNIKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department “Fire Safety of Technological Processes and Production”, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru

УДК 614.8/551.508.94

Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 3

© А. С. Харламенков 

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

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены варианты реализации профилактической молниезащиты на основе применения локационных систем обнаружения молний с локально установленными детекторами. Проведен анализ нормативной литературы и научных публикаций по данному направлению. Даны технические характеристики современных датчиков фиксации грозовых разрядов. Представлена обобщенная информация о развитии системы грозо-пеленгации на территории России. Показаны способы организации таких систем на пожаровзрывоопасных объектах и их основные отличия.

Ключевые слова: профилактическая молниезащита; производственный риск; пожарная безопасность; технологические операции; грозопеленгационная система.

Для цитирования: Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 3 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 63-67.

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

Modern lightning protection of buildings and constructions. Part 3

© Aleksandr S. Kharlamenkov 

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

ABSTRACT

Variants of the implementation of preventive lightning protection based on the use of location-based lightning detection systems with locally installed detectors are considered. Analysis of normative literature and scientific publications in this area conducted. The technical characteristics of modern lightning discharge detectors are given. Summarized information about the development of lightning detection systems on the territory of Russia is presented. The ways of organizing such systems at fire and explosion hazardous facilities and their main differences are shown.

Keywords: preventive lightning protection; production risk; fire safety; technological operations; lightning location systems.

For citation: A. S. Kharlamenkov. Modern lightning protection of buildings and constructions. Part 3. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 63-67 (in Russian).

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



ВОПРОС:

В рубрике “Вопрос–Ответ” № 6 журнала за 2019 г. и № 1 за 2020 г. были рассмотрены существующие технические решения молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий, в том числе с применением активных молниеприемников, работающих по принципу раннего выброса стримера (ESE), и устройств нейтрализации прямого удара молнии (DAS, CTS, PDCE, CMCE и BCAT/BLT). По результатам анализа научной литературы было установлено, что вышеперечисленные системы молниезащиты на практике показали низкую эффективность по сравнению с классическими молниеотводами. Это обстоятельство указывает на необходимость продолжения научных изысканий в области совершенствования систем управления траекторией движения канала молнии.

Вместе с тем решение проблемы создания надежной системы молниезащиты направило многих специалистов по другому исследовательскому пути. Его суть заключается в том, что если защититься от удара молнии невозможно, то следует к нему подготовиться. Другими словами, если ущерб от удара молнии не избежать, то следует снизить его до минимума за счет принятия превентивных мер. Каким способом можно снизить ущерб от удара молнии в объект без повышения эффективности действия существующих систем молниезащиты?

ОТВЕТ:

В предыдущих частях статьи [1, 2] рассматривался поиск действенных технических решений по защите зданий и сооружений от прямых ударов молнии и

ее вторичных воздействий. При этом основной акцент был сделан на поиске путей управления траекторией движения молнии, который показал свою несостоятельность. Поэтому разумным решением может являться поиск способов заблаговременного прогнозирования и мониторинга грозовой обстановки вблизи объекта защиты и своевременного принятия мер технического и организационного характера для обеспечения безопасности производственных работ и персонала.

Такие способы относятся к профилактической (превентивной) молниезащите, применение которой особенно актуально на территории пожаровзрывоопасных объектов.

Профилактическая молниезащита включает в себя:

1) технические средства мониторинга и прогнозирования грозовой активности в месте расположения объекта защиты (локационные системы обнаружения молний и локальные детекторы фиксации разрядов);

2) организационные мероприятия по подготовке к наступлению грозовой обстановки на объекте.

В Российской Федерации нормативные требования по реализации профилактической молниезащиты на промышленных объектах отсутствуют, в то время как в ряде европейских стран это направление активно развивается. На сегодняшний день разработаны и введены в действие стандарты с требованиями к локационным системам обнаружения молний (LLS) [3], работающим в низкочастотном диапазоне LF , и системам грозового оповещения (TWS) с использованием четырех типов детекторов (A, B, C, D) [4]. Каждый из этих типов предназначен для разных задач и оценивает различные фазы грозовой активности (формирование и разрушение грозового облака, удары молнии в землю, межоблачные разряды) на основе различных методов и принципов действия датчиков:

- *MDF* — магнитная пеленгация;
- *TOA* — метод разницы во времени прибытия сигнала;
- *RFI* — радиочастотная интерферометрия;
- *FSM* — измерение напряженности поля;
- *RF* — измерение радиочастотного сигнала.

Основные характеристики применяемых в системах TWS методов и датчиков представлены в таблице.

Датчики, входящие в систему LLS, на сегодняшний день способны обнаруживать более 90 % разрядов молнии со средней ошибкой местоположения в пределах 100 м [5]. Стандарт [3] предъявляет общие минимальные требования к точности местоположения, количества и классификации разрядов. Так, минимальная эффективность обнаружения разрядов (между облаками и облаком и землей) не должна быть ниже 80 % от их реального числа. Максимальная погрешность в определении места удара молнии не может превышать 500 м, а точность классификации разрядов (облако–облако или облако–земля) составляет минимум 85 %. Эти параметры должны оцениваться на основании статистических данных не менее чем по 80 событиям, чтобы они считались достоверными на уровне 90 %. Систем, соответствующих этим стандартам, не так много, но их распространение

в дальнейшем позволит выработать единые требования к мониторингу грозовой активности на всем земном шаре.

Российская Федерация отстает от европейских стран по количеству станций и скорости развития грозопеленгационных систем (ГПС), но ежегодно совершаются уверенные шаги к улучшению данной ситуации.

Существует всемирная сеть регистрации молний WWLLN (*The World Wide Lightning Location Network*), работающая в диапазоне ультранизких частот (VLF). В нее входят также отечественные станции Брянска, Якутска, Владивостока, Магадана, Камчатки и др. [<https://wwlln.net>]. Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) активно разворачивается радиолокационная сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией (ДМРА-С). В пределах Московской области ГПС разворачивается на основе датчиков LS 8000 компании *Vaisala*, имеющих максимальный радиус обзора 625 км. В 2020 г. планируется установка 140 локаторов [6].

Кроме того, фирмой “Алвес” с 2006 г. разворачивается система регистрации гроз, которая на сегодняшний день включает в себя более 77 пунктов регистрации электромагнитного излучения молниевых разрядов. К ним относится Северо-Западный куст ГПС (Великий Новгород, Гдов, Тихвин и Воейково) и Северо-Кавказский куст (Ростов-на-Дону, Сочи, Ставрополь и Темрюк). С 2009 г. к системе присоединились г. Минск (Республика Беларусь) и г. Кировск Мурманской обл. В 2010–2011 гг. в европейской части России установлен 21 комплект индикаторов грозовой опасности, в Центральном и Южном ФО — 15 таких комплектов [7].

Следует понимать, что все системы имеют погрешности в определении места грозового разряда, поэтому их применение в целях профилактической молниезащиты требуется не для оценки точности удара молнии, а для получения информации о приближающемся грозовом фронте, например в виде звукового или светового сигнала.

При проведении технологических операций на открытом воздухе по сливу/наливу горючих (ГЖ) и легковоспламеняющихся (ЛВЖ) жидкостей такая информация может быть полезной, так как позволит рабочему персоналу заблаговременно остановить опасный производственный процесс и покинуть открытую местность [8].

Правилами безопасности [9] запрещается проведение закачки и откачки продукта, замер уровня и отбор проб ЛВЖ и ГЖ из резервуаров во время грозы. В то же время Правила технической эксплуатации нефтебаз [10] обязывают технический персонал осуществлять наполнение и опорожнение железнодорожных цистерн в установленные сроки, которые варьируются от 4 до 10 ч. В зависимости от технических характеристик сливоналивного оборудования это время может быть сокращено до 1,5–2,0 ч. В случае простоя транспортных средств свыше сроков, указанных в договоре с нефтебазой, на последнюю могут накладываться штрафные санкции. Это обуславливает частое игнорирование грозовой обстановки по причине возможных убытков из-за превышения лимитов времени на слив/налив нефтепродуктов.

Характеристики детекторов систем грозового оповещения [4]

Тип датчика или метода измерения	Фиксируемое датчиком физиче- ское явление	Рабочий диапазон частот	Фаза ¹	Тип детектора		Радиус действия датчика, км	Основное назначение
				основ- ной ²	второсте- пенный ³		
FSM	Процессы накопления зарядов	Статические поля DC	1–4	A	–	20	Раннее предупреждение о приближении грозового фронта
MDF	Движение электрических зарядов	Ультранизкие VLF (0,002–30 кГц)	2,3	C	B	Неограни- ченный	Обнаружение грозовой ак- тивности на очень больших расстояниях с низкой эф- фективностью и точностью определения местоположе- ния разрядов
MDF, TOA	Электромагнит- ное излучение (ток молнии)	Низкие LF (30–300 кГц)		C	B	600–900	Определение местоположе- ния ударов молнии в землю в совокупности с межоблач- ными разрядами на боль- шом расстоянии и с высо- кой точностью
TOA	Межоблачные разряды / удары молнии в землю IC/CG	Очень высокие VHF (30–300 МГц)		B	C	200	Определение местоположе- ния ударов молнии в землю и межоблачных разрядов на среднем расстоянии и с высокой точностью
RFI	Межоблачные разряды / удары молнии в землю IC/CG			B	C	300	
RF	Электромагнит- ное излучение (ток молнии)	Низкие LF (30–300 кГц)	3	D	–	100	Для задач метеорологии

¹ Фазы грозовой активности:

- 1 — формирование грозового облака (ячейки) без разрядов молнии;
- 2 — рост грозового облака с межоблачными разрядами;
- 3 — окончание формирования грозового облака с межоблачными разрядами и ударами молнии в землю;
- 4 — разрушение грозового облака с межоблачными разрядами.

² Основной тип детекторов — тип, который является наиболее подходящим для применения.

³ Второстепенный тип детекторов — тип, который также подходит для применения.

Следует понимать, что человек в силу своих ограниченных возможностей способен точно отследить наступление грозы только в пределах прямой видимости (около 5 км) или по звукам громовых раскатов. На расстояниях 15–20 км он уже не слышит гром, а зона его обзора из-за высоких строений или деревьев может быть ограничена. С учетом средней скорости движения грозовой ячейки, равной 20–30 км/ч, работнику будет предоставлен запас времени не более 1 ч для завершения или приостановки пожароопасного технологического процесса.

Нельзя исключать вариант, при котором над самим объектом обычное облако может превратиться в грозовое. Оно формируется примерно за 10–20 мин, а стадия его зрелости длится 20–30 мин [11]. Следовательно, каждая грозовая ячейка может существовать около 1 ч и иметь радиус 2 км в умеренных широтах. Если место проведения пожаровзрывоопасных работ окажется в пределах образования грозовой ячейки, то персоналу просто

не останется времени на выполнение действий, указанных в технологических картах.

В связи с этим применение локальных детекторов, установленных вблизи или непосредственно на территории защищаемого объекта, позволит организовать систему предупреждения и снизить риск возникновения пожара и взрыва в результате удара молнии.

Система может быть построена в рамках зоновой концепции, которая именуется *зонная профилактическая молниезащита (ZPLP)* [12]. Принцип ее работы заключается в разделении защищаемого пространства на три условных зоны (см. рисунок):

- зона 1 (зона опасности): объект защиты находится в зоне прямого или косвенного воздействия молнии с радиусом R_1 . Данные, собираемые детекторами о местах ударов молнии в этом пространстве, должны быть точными для немедленного оповещения технического персонала о присутствии грозового облака;



Пример распределения зон системы профилактической молниезащиты с применением локальных детекторов

- зона 2 (зона предупреждения): грозовое облако не представляет прямой опасности для объекта защиты в зоне между R_1 и R_2 . Данные с детекторов должны быть точными, и технический персонал должен быть оповещен о приближении опасности. С момента тревоги все пожаровзрывоопасные операции должны быть прекращены и приняты меры по обеспечению безопасности людей и оборудования. Радиус этой зоны обычно составляет порядка 20 км [13];
- зона 3 (зона мониторинга): детекторы должны фиксировать вспышки молнии без особой точности в пределах границы $R_3 \approx 30$ км и более [14].

У системы ZPLP имеется и ряд недостатков. Один из них связан с проблемой точного определения направления движения грозового облака. Возможна ситуация, когда при входе грозовой ячейки в зону предупреждения R_2 и сигнализация на объекте сработает, и превентивные меры будут приняты, а грозовой фронт пройдет мимо зоны опасности R_1 . В этом случае объекту может быть нанесен косвенный экономический ущерб от простоя. Второй недостаток заключается в проблеме точного определения скорости приближения грозы. От этого параметра зависит время обнаружения грозовой ячейки, а значит и размеры временного коридора для проведения защитных мероприятий. Если выполнение превентивных действий начнется слишком поздно, то объекту может быть нанесен прямой ущерб от удара молнии.

Решению этих проблем посвящен ряд работ [15–18], в которых предлагаются два алгоритма анализа поступающей информации о грозовой активности:

- HRPLP — высоконадежная профилактическая молниезащита;
- FPLP — неточная (нечеткая) профилактическая молниезащита.

Оба типа используют сведения, получаемые в режиме реального времени от ГПС с помощью детекторов, входящих в состав системы. По этим данным система HRPLP формирует критерий срабатывания тревоги на основе определения направления движения грозового облака и его скорости. Оповещение срабатывает только в том случае, если грозовое облако находится близко к зоне опасности и движется в ее сторону. При этом запаса времени должно быть достаточно для выполнения профилактических мероприятий.

Главное отличие системы HRPLP от ZPLP в том, что она фокусируется на прогнозировании движения всех грозовых ячеек, окружающих объект, а не на статической зоне предупреждения, в которую входит облако. За счет этого достигается более точная оценка необходимости выполнения превентивных действий. Такая система более эффективна, но по финансовым вложениям на ее построение может оказаться затратной. При использовании локальных детекторов с менее высокой точностью определения точки удара молнии можно сократить расходы на построение системы.

Неточная система молниезащиты FPLP использует для оценки опасности те же данные ГПС, что и система HRPLP. Для ее работы применяется алгоритм вывода конечных данных при помощи системы нечеткой логики, разработанной Такаги – Сугено [19]. Суть нечеткой логики заключается в определении вероятности прохождения ячейки над объектом в зоне опасности. Система сформирована в виде обобщенных данных, распределенных по классам: “точно нет”, “нет”, “возможно”, “да” и “точно да”. Название системы “неточная” говорит о том, что она показывает конечному пользователю “степень опасности” грозовой ячейки в форме классов, а не в виде числовых значений.

Система FPLP позволяет получить информацию о фактическом времени до наступления грозы. Для этого выполняется расчет относительного времени t [16]:

$$t = (t_{\text{гроз}} - t_{\text{мер}}) / t_{\text{мер}},$$

где $t_{\text{гроз}}$ — расчетное время до наступления грозы;

$t_{\text{мер}}$ — время, необходимое персоналу для выполнения превентивных действий.

Время t является одним из факторов, определяющих успешную профилактическую подготовку к наступлению грозы. Так как значение $t_{\text{мер}}$ заранее известно, то, умножая его на относительное время t , можно получить фактическое время для принятия превентивных мер.

Вторым фактором является необходимость начала выполнения профилактических мероприятий. Он варьируется от 0 до 1. При значении, равном 1, требуется немедленное выполнение превентивных действий.

В результате всех промежуточных операций система FPLP выводит по одному значению для каждого фактора. Для фактора времени есть три уровня — низкий, средний, высокий; для фактора необходимости выполнения превентивных действий — очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий. На основании полученных данных системой FPLP формируется команда на включение тревоги.

Таким образом, для обеспечения безопасного проведения технологических операций, технического обслуживания и ремонтных работ на пожаровзрывоопасных объектах могут быть применены различные системы профилактической молниезащиты (ZPLP, HRPLP, FPLP) в комплексе с уже установленными молниеотводами и устройствами защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 6. — С. 89–91.
2. Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 89–92.
3. IEC 62858–2019. Ed. 2: Lightning density based on lightning location systems (LLS) — General principles. URL: <http://www.standards.ru/document/6475841.aspx>.
4. IEC 62793–2016. Ed. 1: Protection against lightning — Thunderstorm warning systems. URL: <http://www.standards.ru/document/6140910.aspx>.
5. Pédeboy S. Introduction to the IEC 62858: Lightning density based on Lightning Locating Systems // ILPS 2018 — International Lightning Protection Symposium (October 24–27, 2018, Shenzhen, China). URL: https://www.researchgate.net/publication/328687814_Introduction_to_the_IEC_62858_lightning_density_based_on_Lightning_Locating_Systems.
6. Мозер А. Л. Визуализация данных грозопеленгаторов и доплеровских метеорологических локаторов с двойной поляризацией // Ученые записки РГМУ. — 2016. — № 43. — С. 174–183.
7. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Экспериментальная грозопеленгационная система // Труды главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. — 2012. — № 567. — С. 188–200.
8. Марков А. Г., Харламенков А. С., Абросимов С. В. Система мониторинга и прогнозирования грозовой обстановки на объектах хранения нефтепродуктов // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции (25 октября 2019 г., г. Железногорск). — Железногорск : Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. — С. 161–172.
9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности нефтегазоперерабатывающих производств” : приказ Ростехнадзора от 29.03.2016 № 125 (с изм. 15.01.2018). URL: <https://le-galacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-29032016-n-125-ob-utverzhenii-federalnykh/>.
10. Правила технической эксплуатации нефтебаз : приказ Минэнерго РФ от 19.06.2003 № 232 // Российская газета. — 05.11.2003. — № 224. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901866234>.
11. Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Физика грозовых облаков. — М. : Препринт ФИАН РФ, 2004. — № 2. — 39 с.
12. Mäkelä J., Porjo N., Jantunen J., Ahola T., Mäkelä A., Tuomi T., Cooray V. Single-station narrowband ranging of active storm cells without lightning-type discrimination // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2009. — Vol. 71, No. 8-9. — P. 911–922. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.03.005.
13. Gulyás A., Mäkelä J., Németh B., Cooray V., Kiss I., Berta I. Local detectors in preventive lightning protection // Journal of Lightning Research. — 2012. — Vol. 4, No. 1. — P. 139–148. DOI: 10.2174/1652803401204010139.
14. Mäkelä J. Electromagnetic signatures of lightning near the HF frequency band: Academic Dissertation in Physics. — Helsinki : Finnish Meteorological Institute, 2009. — 100 p.
15. Gulyás A., Kiss I. High reliability preventive lightning protection // 20th International Lightning Detection Conference (April 21–23, 2008, Tucson, AZ, USA). — 9 p.
16. Németh B., Kiss I. Application of fuzzy logic based expert system in preventive lightning protection // Journal of Electrostatics. — 2009. — Vol. 67, No. 2-3. — P. 477–481. DOI: 10.1016/j.elstat.2009.01.046.
17. Barrera L. F., Salazar S., Bolaños F. A Fuzzy inference system for lightning location. — 2012. — 4 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267554302>.
18. de Souza A. N., da Silva I. N., Zago M. G., Flauzino R. A. Mapping lightning processes using fuzzy inference system // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (May 12–17, 2002, Honolulu, USA). — 2002. — Vol. 1-2. — 5 p. DOI: 10.1109/FUZZ.2002.1005027.
19. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1985. — Vol. SMC-15, Issue 1. — P. 116–132. DOI: 10.1109/tsmc.1985.6313399.

Материал поступил в редакцию 20.03.2020
Received March 20, 2020

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Senior Lecturer of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: 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.

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т. п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов “and” (и), “of” (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей “a”, “the” и т. п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т. п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т. д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников. При этом в него не следует включать ссылки на учебники, учебные пособия, патенты, ГОСТы, СП, приказы, распоряжения и другие нормативные документы, сайты компаний и т.п. Информация о них должна быть дана непосредственно по тексту или в сносках. Если статья рассматривает проблемы нормирования, то нормативные документы допускается включать в Список литературы.

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 7 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>.

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 настройки справа вверх флажок “Американская (для визы США)”; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т. п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D. N. Sokolov, L. P. Vogman, V. A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost' / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35–48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы–комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале “Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

Международная
выставка и конференция
по безопасности

**15 – 16
сентября 2020**

Международный выставочный центр ЭКСПО
г. Нур-Султан, Казахстан



Пожарная безопасность и чрезвычайные ситуации

Эффективная площадка для производителей
и поставщиков систем противопожарной защиты
и аварийно-спасательного оборудования

РАЗДЕЛЫ

- Системы пожарной сигнализации
- Огнетушители, пожарные краны и инвентарь
- Модульные установки водяного, порошкового и газового пожаротушения
- Системы дымоудаления и теплоудаления
- Огнеупорные вещества и смеси
- Поисково-спасательное оборудование и снаряжение
- Медицинское снаряжение и средства жизнеобеспечения
- Пожарная спецтехника и машины
- Транспортные средства для ликвидации последствий ЧС и оказания медицинской помощи
- Специальная защитная одежда и средства индивидуальной защиты
- Быстровозводимые укрытия

РЕКЛАМА

По вопросам участия:

Тел: +7 7172 64 23 23 (вн. 208)

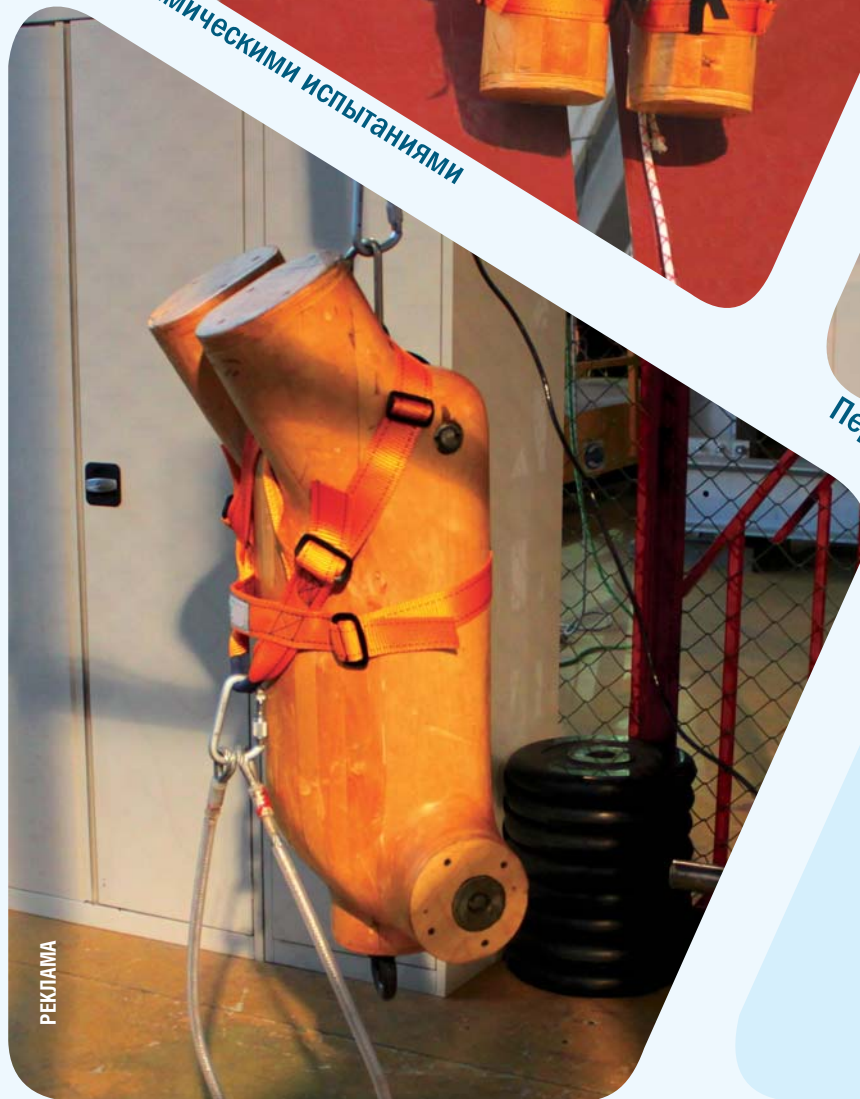
E-mail: natali@astana-expo.com



Перед динамическими испытаниями



Перед статическими испытаниями



РЕКЛАМА

После статических испытаний. Общий вид

ИСПЫТАНИЕ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

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

Продолжается
подписка
на журнал

2020

ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



По вопросам подписки
просьба обращаться
по тел.: (495) 228-09-03,
8-909-940-01-85 или
по e-mail info@fire-smi.ru

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2020 г. (3 номера) — 5901 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 10260 руб.

ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ:

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2020 г. (3 номера) — 2460 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 4680 руб.

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

- через ООО “Издательство “Пожнаука”;
- ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА:
 - ООО “Урал-Пресс”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
 - ООО “Агентство “Книга Сервис”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
 - ЗАО “ПРЕССИНФОРМ”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой)

10-я Юбилейная Казахстанская
международная выставка

Охрана, безопасность, средства спасения,
противопожарная защита



securex
Kazakhstan

10 лет
успеха

Алматы, Казахстан

**6 – 8
октября
2020**

КЦДС «Атакент»



Системы
и технические
средства
видеонаблюдения



Системы
и средства
ограничения
доступа



Системы
защиты
периметра



Системы и средства
обеспечения
пожарной
безопасности



Технические
средства
обеспечения
безопасности

www.securex.kz

Организаторы:



ТОО "Itesca" (для стран СНГ и международных компаний)
Тел.: +7 727 258 34 34; E-mail: julia.palagutina@itesca.kz

Атакент Экспо (для казахстанских компаний)
Тел.: +7 727 275 13 57; E-mail: atakent.expo@mail.ru





ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Научно-
исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ железобетонных конструкций
- ♦ противопожарных преград
- ♦ легкосбрасываемых конструкций
- ♦ фасадных систем
- ♦ палуб, переборок

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

Свидетельство о признании испытательной лаборатории
Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.
РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.