

6-2023

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



*Успешного
Нового Года!*



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 25.12.2023.

Выход в свет 29.12.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

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

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: www.ro.wikipedia.org,
www.krd.energo-e.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Е.В. ГОЛОВИНА, А.В. КАЛАЧ
Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся
материалов для использования в климатических условиях
Арктической зоны

5

E.V. GOLOVINA, A.V. KALACH
Study of flame-retardant properties of thermally
expanding materials for use in climatic conditions of
the Arctic zone

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

П.С. ЛАНСКОЙ, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО
Анализ существующих специализированных программных
комплексов, пригодных для расчетов и решения
междисциплинарных задач при моделировании огневых
воздействий на строительные конструкции

13

P.S. LANSKOY, D.A. KOROLCHENKO
Analysis of existing specialized software
suitable for calculations and solving interdisciplinary
tasks in modelling fire effects
on building structures

И.В. САМАРИН, В.В. КУХАРСКИЙ
Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных
системах пожаровзрывобезопасности с применением
цифровых двойников объектов ТЭК

25

I.V. SAMARIN, V.V. KUKHARSKIY
Taking into account the human factor influence in automated
fire and explosion safety systems using digital twins of fuel
and energy facilities

А.А. ГУСАРОВА
Современные информационные технологии как инструмент
повышения пожарной безопасности зданий

36

A.A. GUSAROVA
Modern information technologies as a tool to improve
fire safety of buildings

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

С.В. ПУЗАЧ, Р.Г. АКПЕРОВ, О.Б. БОЛДРУШКИЕВ,
К.П. ЩЕТНЕВ, Е.Н. КОСЬЯНОВА
Экспериментальное определение показателей пожарной
опасности технических масел в маломасштабных установках

47

S.V. PUZACH, R.G. AKPEROV, O.B. BOLDRUSHKIEV,
K.P. SHCHETNEV, E.N. KOSYANOVA
Experimental determination of fire hazard indicators
of technical oils in small-scale installations

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

С.П. АНТОНОВ, А.Н. ГАРАЩЕНКО,
В.И. ГОЛОВАНОВ, Н.С. НОВИКОВ
Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций
с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой

56

S.P. ANTONOV, A.N. GARASHCHENKO,
V.I. GOLOVANOV, N.S. NOVIKOV
Prediction of fire resistance of reinforced concrete structures
with polypropylene microfibre or fire protection

А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО, Н.В. ГРОМОВ
Особенности разрушаемых элементов предохранительных
конструкций, используемых для минимизации последствий
взрывных аварий в помещениях

69

A.D. KOROLCHENKO, N.V. GROMOV
Destructible elements of safety structures
used to minimize the consequences of explosive
accidents in premises

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Пожарная безопасность парковочных мест
электромобилей

79

A.S. KHARLAMENKOV
Fire safety of electric vehicle
parking spaces

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2023 г.

83

AUTHORS INDEX '2023

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2023 г.

86

GUIDE INDEX OF THE ARTICLES
PUBLISHED IN 2023

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.



Огнезащитные свойства терморасширяющихся материалов

Стр. 5



Стр. 36

Информационные технологии как инструмент ПБ зданий



Определение пожарной опасности технических масел

Стр. 47



Стр. 69

Предохранительные конструкции для минимизации взрывных аварий

Стр. 79



Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Signed for printing 25.12.2023.

Date of publication 29.12.2023.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science
and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom
of Russia, Yekaterinburg, Russia)

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

V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical
Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 5–12
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):5-12

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12>

Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны

Екатерина Валерьевна Головина¹✉, Андрей Владимирович Калач^{2, 3}

¹Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение средств огнезащиты на нефтегазовых предприятиях, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к оценке их огнезащитной эффективности. Прежде всего, испытания необходимо проводить в условиях углеводородного температурного режима, вероятность развития которого весьма высока на объектах хранения и переработки нефти и газа. Углеводородный режим пожара характеризуется резким ростом температуры (в течение 5 мин температура может достигнуть 1100 °С) и возникновением избыточного давления.

Целью исследования является выбор огнезащитного терморасширяющегося покрытия для возможности применения на объектах нефтегазовой отрасли в Арктической зоне. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведение испытаний огнезащитной эффективности терморасширяющихся материалов на основе водной дисперсии, акрилового, эпоксидного и силиконового связующего;
- сравнительный анализ огнезащитных свойств исследуемых интумесцентных композиций.

Методология. В соответствии с ГОСТ 1363-2-2014 и ГОСТ 53295-2009 были проведены испытания на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима. Исследования проводились на универсальной установке для испытаний на огнезащитную эффективность средств огнезащиты и огнестойкость строительных конструкций и заполнения проемов, аттестованной как для стандартного температурного режима по ГОСТ 30.247.0-94, так и для углеводородного температурного режима по ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014.

Результаты. В результате проведенных исследований были получены значения достижения критической температуры (500 °С) образцами с нанесенными на них огнезащитными покрытиями.

Выводы. На основе экспериментальных исследований проведен сравнительный анализ огнезащитных свойств интумесцентных композиций. Сделан вывод о приоритетном выборе огнезащитных терморасширяющихся составов на основе эпоксидных смол для промышленных объектов, расположенных в Арктическом регионе.

Ключевые слова: огнезащитная эффективность; вспучивающийся огнезащитный состав; углеводородный температурный режим; предел огнестойкости; объект нефтегазовой отрасли; огнезащитное покрытие

Для цитирования: Головина Е.В., Калач А.В. Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12

✉ Головина Екатерина Валерьевна, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in climatic conditions of the Arctic zone

Ekaterina V. Golovina¹✉, Andrey V. Kalach^{2, 3}

¹Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

³Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The application of fire protection products at oil and gas enterprises located in the Arctic region requires a special approach to the assessment of their fire-retardant efficiency. First of all, it is necessary to conduct the tests under conditions of a hydrocarbon temperature regime, the probability of development of which is very high at oil and gas storage and processing facilities. The hydrocarbon fire regime is characterized by a sharp temperature rise (within 5 minutes the temperature can reach 1,100 °C) and the occurrence of overpressure.

The purpose of the research is the choice of a flame-retardant thermally expanding coating for the possibility of application at the objects of oil and gas industry in the Arctic zone. To achieve this goal, the following tasks were solved:

- testing flame-retardant effectiveness of thermally expanding materials based on water dispersion, acrylic, epoxy and silicone binder;
- comparative analysis of flame retardant properties of studied intumescent compositions.

Methodology. In accordance with GOST 1363-2-2014 and GOST 53295-2009, tests for fire-retardant efficiency under hydrocarbon temperature conditions were carried out. The research was carried out on the universal installation for testing the fire-retardant efficiency of fire protection means and fire resistance of building structures and filling openings, certified both for the standard temperature regime according to GOST 30.247.0-94 and for the hydrocarbon temperature regime according to GOST R EN 1363-2-2014.

Results. As a result of the conducted research, the values of reaching the critical temperature (500 °C) by the samples with fire-resistant coatings applied to them were obtained.

Conclusions. Based on experimental studies, a comparative analysis of the flame retardant properties of intumescent compositions was carried out. The conclusion is made about the priority choice of flame-retardant thermo-expanding compositions based on epoxy resins for industrial facilities located in the Arctic region.

Keywords: flame retardant efficiency; intumescent flame retardant composition; hydrocarbon temperature regime; fire resistance limit; oil and gas industry object; flame retardant coating

For citation: Golovina E.V., Kalach A.V. Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in climatic conditions of the Arctic zone. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12 (rus).

✉ Ekaterina Valeryevna Golovina, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Введение

Ингибирование процессов горения имеет значительную практическую значимость для предотвращения и тушения пожаров [1, 2]. Огнезащитные составы, как правило, используются в качестве добавок для повышения стойкости к воспламенению и уменьшения распространения пламени без существенного влияния на их свойства [3, 4]. Такие огнезащитные составы способствуют образованию продуктов разложения в газовой фазе с эффектом тушения пламени, но также способствуют появлению защитного покрытия на поверхности материала [5–7]. Добавка ингибирующих компонентов позволяет снижать вероятность воспламенения материала и замедляет распространение пламени, что обеспечивает большее время для эвакуации или проведения мероприятий по тушению пожара [8–11].

Необходимо отметить, что предыдущие исследования в области огнезащитных составов [12–14] были в основном сосредоточены на поиске подходящих химических компонентов, отвечающих определенным критериям, таким как подавление пламени, и не учитывали негативное влияние на объекты окружающей среды.

Применение средств огнезащиты на нефтегазовых предприятиях, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к оценке их огне-

защитной эффективности. Исследование географических и климатических особенностей Арктического региона позволило выделить ключевые моменты, характеризующие специфику промышленных объектов, расположенных в арктических районах, главными из которых являются:

- длительный сезон с отрицательными среднесуточными температурами: годовая разница температур (июль и январь) колеблется от 40–41 до 53 °C;
- влажность атмосферы воздуха арктических районов, что сказывается на коррозионной стойкости применяемых огнезащитных материалов. Следовательно, огнезащитные средства, применяемые в арктических районах, должны соответствовать следующим требованиям [13]:
- возможность нанесения при отрицательных температурах и в условиях повышенной влажности;
- работоспособность и сохранение характеристик прочности при температурах от –50 до –75 °C.

Также испытания необходимо проводить в условиях углеводородного температурного режима, вероятность развития которого весьма высока на объектах хранения и переработки нефти и газа. Углеводородный режим пожара характеризуется резким ростом температуры (в течение 5 мин температура может достигнуть 1100 °C) и возникновением избыточного давления.

Методология

В качестве объектов исследования оценки огнезащитной эффективности были выбраны терморасширяющиеся огнезащитные составы (далее — ОЗС) разной химической природы, характеристики которых, согласно технической документации, соответствуют специфике промышленных объектов, расположенных в арктических районах. Покрытия наносились по схеме в соответствии с технической документацией (табл. 1):

- грунтовочный слой + огнезащитный материал — для эпоксидных и силиконовых ОЗС;
- грунтовочный слой + огнезащитный материал + + покрывной финишный слой — для водных и акриловых ОЗС [15–18].

В качестве образцов использовались стальные колонны двутаврового сечения с приведенной толщиной металла 3,4 мм. Подготовка поверхности металла перед окрашиванием заключалась в уда-

Таблица 1. Толщины систем покрытий образцов для испытаний на огнезащитную эффективность

Table 1. Thicknesses of coating systems of samples for fire-retardant efficiency tests

Вид ОЗС Type of FRC	Номер образца Number of sample	Толщина грунтовочного слоя, мм The thickness of the primer layer, mm	Толщина огнезащитного материала, мм The thickness of the flame retardant material, mm	Толщина финишного слоя, мм Thickness of the finishing layer, mm	Общая толщина, мм Total thickness, mm
ОЗС на силиконовой основе Silicone-based FRC	1.1	0,6–0,7	4,4	–	5,0
	1.2		4,1		5,1
	1.3		4,1		4,7
ОЗС на эпоксидной основе Epoxy-based FRC	2.1	0,6–0,7	3,8	–	4,4
	2.2		3,9		4,5
	2.3		3,7		4,4
ОЗС на акриловой основе FRC based on acrylic	3.1	0,6–0,7	3,5	1,3	5,4
	3.2		3,8	1,5	5,9
	3.3		3,6	1,2	5,4
ОЗС на водной основе Water-based FRC	4.1	0,6–0,7	4,0	1,5	6,1
	4.2		4,0	1,4	6,0
	4.3		3,8	1,1	5,5

лении жировых загрязнений и абразивоструйной обработке до степени Sa 2 ½ в соответствии с ГОСТ 9.402–2004¹. Покрытия нанесены методом пневматического распыления. Сушка покрытий естественная при температуре 18–20 °С и относительной влажности 15–20 %. Толщины покрытий измерены магнитным толщиномером Minitest 600 В (см. табл. 1).

В соответствии с ГОСТ 1363-2–2014² и ГОСТ 53295–2009³ были проведены испытания на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима на установке для огневых испытаний для каждого огнезащитного покрытия.

Сущность метода заключается в тепловом воздействии на опытный образец с нанесенным покрытием и определении времени от начала теплового воздействия до наступления предельного состояния опытного образца. Температура на поверхности образца измеряется с помощью термопар, изготовленных из провода диаметром не более 0,75 мм, которые устанавливаются методом зачеканивания на необогреваемую поверхность образца в количестве трех штук. Одна из термопар устанавливается в центре образца, а две другие — по диагонали на расстоянии 200 ± 5 мм от центра.

Температура металла испытываемого образца рассчитывается как среднее арифметическое значение показаний термопар, расположенных в установленных местах.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с ГОСТ 53295–2009³, за результат принимается время достижения образцом предельного состояния. За предельное состояние принимается достижение металлом опытного образца критической температуры, равной 500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар), как это предписано в ГОСТ 53295–2009.

Результаты исследований ОЗС на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима графически представлены на рис. 1–4.

Сравнительный анализ результатов, полученных при исследовании ОЗС разной химической природы в условиях углеводородного температурного режима, приведен в табл. 2.

¹ ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

² ГОСТ 1363-2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость.

³ ГОСТ 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности.

Таблица 2. Результаты испытаний ОЗС на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима**Table 2.** The results of tests of the FRC for fire-retardant efficiency in the conditions of a hydrocarbon temperature regime

Показатель Indicator	ОЗС на силиконовой основе Silicone-based FRC			ОЗС на эпоксидной основе Epoxy-based FRC			ОЗС на акриловой основе FRC based on acrylic			ОЗС на водной основе Water-based FRC		
Номер образца Number of sample	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
$\tau_{кр}$, мин τ_{cr} , min	34	34	30	49	53	47	21	24	19	15	14	13
$\tau_{ср}$, мин τ_{mean} , min	33			50			21			14		

Примечание: $\tau_{кр}$ — время достижения критической температуры (500 °C) металлической конструкции; $\tau_{ср}$ — среднее значение времени достижения критической температуры металлической конструкцией.

Note: τ_{cr} — is the time to reach the critical temperature (500 °C) by a metal structure; τ_{mean} — is the average value of the time to reach the critical temperature by a metal structure.

В соответствии с данными табл. 2, наименьшее время достижения критической температуры образца наблюдается у композиций на основе водной дисперсии — от 13 до 15 мин. Наибольшее время $\tau_{кр}$ показали составы на основе эпоксидных смол — $\tau_{ср}$ составляет 50 мин. Время достижения критической температуры металлической конструкцией для акриловых огнезащитных композиций составляет от 19 до 24 мин. В то же время при проведении испытаний акриловых и эпоксидных ОЗС наблюдается схожесть поведения огнезащитного покрытия: при 5 мин от начала испытаний анализируемые материалы достигают температуры

200–250 °C, что соответствует процессу образования пенококса в интумесцентных системах (см. рис. 1, 3). В дальнейшем у акриловых ОЗС отмечается быстрый рост температуры защищаемой конструкции, что свидетельствует о низкой огнезащитной способности образовавшегося вспученного слоя [19, 20].

В процессе исследования на огнезащитную эффективность силиконовых композиций температура металлоконструкции не превышает 130 °C в течение 15 мин от начала испытаний (см. рис. 2). Достижение температуры 350 °C длится 10 мин и затем наблюдается рост температуры до 500 °C.

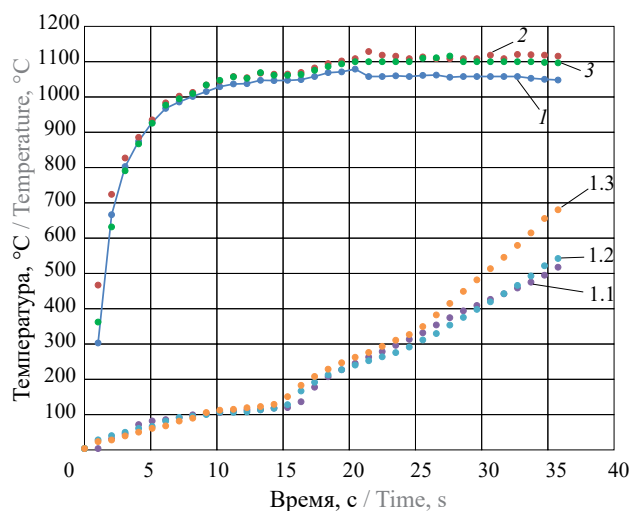


Рис. 1. Результаты испытаний ОЗС на силиконовой основе на огнезащитную эффективность: 1.1, 1.2, 1.3 — анализируемые образцы на силиконовой основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 1.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 1.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 1.3

Fig. 1. Results of tests of silicone-based FRC for fire-retardant efficiency: 1.1, 1.2, 1.3 — analyzed silicone-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 1.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 1.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 1.3

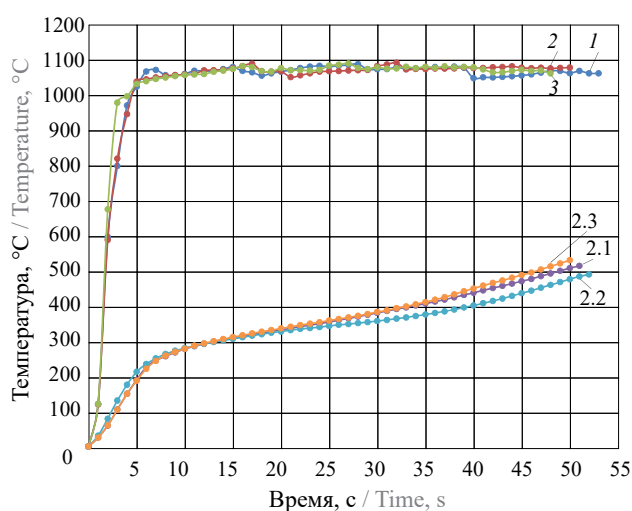


Рис. 2. Результаты испытаний ОЗС на основе эпоксидных смол на огнезащитную эффективность: 2.1, 2.2, 2.3 — анализируемые образцы на эпоксидной основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 2.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 2.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 2.3

Fig. 2. The results of tests of FRC based on epoxy resins for fire-retardant efficiency: 2.1, 2.2, 2.3 — analyzed epoxy-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 2.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 2.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 2.3

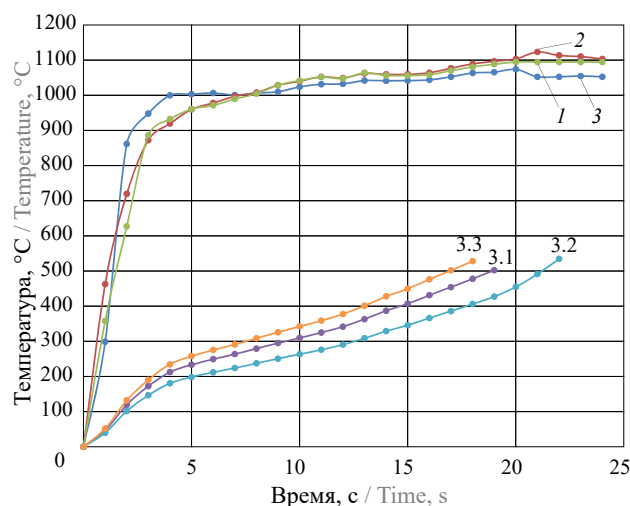


Рис. 3. Результаты испытаний ОЗС на основе акриловой дисперсии на огнезащитную эффективность: 3.1, 3.2, 3.3 — анализируемые образцы на акриловой основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 3.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 3.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 3.3

Fig. 3. The results of tests of the FRC based on acrylic dispersion for fire-retardant efficiency: 3.1, 3.2, 3.3 — analyzed acrylic-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 3.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 3.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 3.3

Выводы

Таким образом, экспериментально установлено, что огнезащитный терморасширяющийся материал на основе эпоксидных смол обладает наибольшей огнезащитной эффективностью. В сравнении с силиконовым ОЗС анализируемые эпоксидные составы на 34 % эффективнее покрытий на основе силиконового связующего и на 72 % эффективнее композиций на основе водной дисперсии. Это связано с тем, что в условиях углеводородного режима горения происходит резкий скачок температуры до 1100 °С, в связи с чем матрицы, состоящие из полимеров-термопластов, начинают плавиться, и, как следствие, происходит стекание композиции с защищаемой поверхности, в то время как олигомеры, содержащие эпоксидные группы (эпоксиды), способны создать условия для сохранения огнезащитного состава на металлоконструкции до достижения температуры формирования пенококсового слоя. Именно бла-

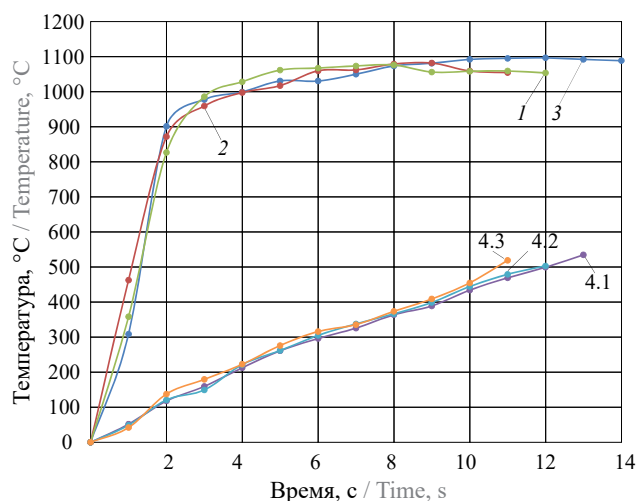


Рис. 4. Результаты испытаний ОЗС на основе водной дисперсии на огнезащитную эффективность: 4.1, 4.2, 4.3 — анализируемые образцы на водной основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 4.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 4.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 4.3

Fig. 4. The results of tests of the FRC based on water dispersion for fire-retardant efficiency: 4.1, 4.2, 4.3 — analyzed water samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 4.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 4.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 4.3

годаря образовавшемуся пенококсу происходит обеспечение необходимого уровня огнезащитной эффективности металлических конструкций промышленных объектов в условиях не только стандартного, но и углеводородного горения.

В соответствии с технической документацией испытуемые ОЗС на основе эпоксидных смол удовлетворяют требованиям, необходимым для применения в условиях Арктического региона, указанных выше (возможность нанесения при отрицательных температурах, сохранение эксплуатационных характеристик в условиях низких температур), а также производитель заявляет о повышенной износостойкости, хорошей адгезии материалов при взаимодействии с осадками.

Таким образом, на объектах нефтегазовой отрасли в условиях Арктической зоны целесообразно применение огнезащитных вспучивающихся составов на основе эпоксидного связующего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Masri A.R. Chemical inhibition of nonpremixed flames of hydrocarbon fuels with CF Br // *Combustion Science and Technology*. 1994. Vol. 96 (4–6). Pp. 189–212. DOI: 10.1080/00102209408935355
2. Wang L., Jiang Y., Qiu R. Experimental study of combustion inhibition by trimethyl phosphate in turbulent premixed methane/air flames using OH-PLIF // *Fuel*. 2021. Vol. 294. P. 120324. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120324
3. Green J. Mechanisms for flame retardancy and smoke suppression : a review // *Journal of Fire Sciences*. 1996. Vol. 14 (6). Pp. 426–442. DOI: 10.1177/073490419601400602

4. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю., Калач А.В., Шаранов С.В., Калач Е.В. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 12. С. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12
5. Schmitt E. Phosphorus-based flame retardants for thermoplastics // *Plastics Additives and Compounding*. 2007. Vol. 9(3). Pp. 26–30. DOI: 10.1016/S1464-391X(07)70067-3
6. Kahraman M., Kizilcan N. Investigation of flame retardancy properties of polypropylene-colemanite and intumescent flame retardant additive blends // *Synthesis and Sintering*. 2022. Vol. 2. Pp. 110–119. DOI: 10.53063/synsint.2022.2397
7. Isitman N.A., Doğan M., Bayramlı E., Kaynak C. Fire retardant properties of intumescent polypropylene composites filled with calcium carbonate // *Polymer Engineering Science*. 2011. Vol. 51. Pp. 875–883. DOI: 10.1002/pen.21901
8. Steinhäuser M., Ferraro F., Schneider M., Zentgraf F., Greifenstein M., Dreizler A. et al. Effect of flame retardants on side-wall quenching of partially premixed laminar flames // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2022. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.207
9. Liu B.W., Zhao H.B., Wang Y.Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials // *AdvMater*. 2022. Vol. 4 (46). DOI: 10.1002/adma.202107905
10. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions // *Buildings*. 2020. Vol. 10. P. 185. DOI: 10.3390/buildings10100185
11. Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 71–81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81
12. Головина Е.В., Калач А.В., Беззапонная О.В., Крутолапов А.С., Шаранов С.В. Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов. Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 24–33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33
13. Головина Е.В., Калач А.В. Анализ средств огнезащиты стальных конструкций нефтегазового комплекса для климатических условий Арктического региона : монография. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2023. 122 с.
14. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers // *Polymers (Basel)*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/polym14142911
15. Головина Е.В. Оценка эффективности современных средств огнезащиты стальных конструкций для объектов нефтегазовой отрасли в условиях Арктического региона // Техносферная безопасность. 2022. № 2 (35). С. 46–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49053202>
16. Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72
17. Kim J.H., Baeg D.Y., Seo J.K. Numerical investigation of residual strength of steel stiffened panel exposed to hydrocarbon fire // *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021. Vol. 35. Pp. 203–215. DOI: 10.26748/KSOE.2021.008
18. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions // *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey, September 21–23, 2016. Pp. 1–8.
19. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927>
20. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония : литературный обзор // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813>

REFERENCES

1. Masri A.R. Chemical inhibition of nonpremixed flames of hydrocarbon fuels with CF Br. *Combustion Science and Technology*. 1994; 96(4-6):189-212. DOI: 10.1080/00102209408935355
2. Wang L., Jiang Y., Qiu R. Experimental study of combustion inhibition by trimethyl phosphate in turbulent premixed methane/air flames using OH-PLIF. *Fuel*. 2021; 294:120324. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120324
3. Green J. Mechanisms for flame retardancy and smoke suppression : a review. *Journal of Fire Sciences*. 1996; 14(6):426-442. DOI: 10.1177/073490419601400602

4. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu., Kalach A.V., Sharapov S.V., Kalach E.V. Ways of improving the fire protecting thermal expanding compositions for use in oil and gas industry. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(12):14-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24 (rus).
5. Schmitt E. Phosphorus-based flame retardants for thermoplastics. *Plastics Additives and Compounding*. 2007; 9(3):26-30. DOI: 10.1016/S1464-391X(07)70067-3
6. Kahraman M., Kizilcan N. Investigation of flame retardancy properties of polypropylene-colemanite and intumescent flame retardant additive blends. *Synthesis and Sintering*. 2022; 2:110-119. DOI: 10.53063/synsint.2022.2397
7. Isitman N.A., Doğan M., Bayramlı E., Kaynak C. Fire retardant properties of intumescent polypropylene composites filled with calcium carbonate. *Polymer Engineering Science*. 2011; 51:875-883. DOI: 10.1002/pen.21901
8. Steinhäuser M., Ferraro F., Schneider M., Zentgraf F., Greifenstein M., Dreizler A. et al. Effect of flame retardants on side-wall quenching of partially premixed laminar flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2022. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.207
9. Liu B.W., Zhao H.B., Wang Y.Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials. *AdvMater*. 2022; 4(46). DOI: 10.1002/adma.202107905
10. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions. *Buildings*. 2020; 10:185. DOI: 10.3390/buildings10100185
11. Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovsky Yu.K., Shornikova O.N. Kinetics of foaming of thermally expanding flame retardants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):71-81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81 (rus).
12. Golovina E.V., Kalach A.V., Bezzaponnaya O.V., Krutolapov A.S., Sharapov S.V. Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):24-33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33 (rus).
13. Golovina E.V., Kalach A.V. *Analysis of fire protection means of steel structures of the oil and gas complex for climatic conditions of the Arctic region : monograph*. Yekaterinburg, 2023; 122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50260792> (rus).
14. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers. *Polymers (Basel)*. 2022; 14. DOI: 10.3390/polym14142911
15. Golovina E.V. Evaluation of the effectiveness of modern means of fire protection of steel structures for oil and gas industry facilities in the Arctic region. *Technosphere Safety*. 2022; 2(35):46-55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49053202> (rus).
16. Puzach S.V., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Determination of the actual fire resistance limits of steel structures taking into account the real fire load. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):61-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72 (rus).
17. Kim J.H., Baeg D.Y., Seo J.K. Numerical investigation of residual strength of steel stiffened panel exposed to hydrocarbon fire. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021; 35:203-215. DOI: 10.26748/KSOE.2021.008
18. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions. *Conference: 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. 2016; 1-8.
19. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. On the mechanism of formation of flame-retardant swelling coatings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):33-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
20. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate : review of the literature. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(8):11-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus).

Поступила 14.03.2023, после доработки 25.10.2023;

принята к публикации 02.11.2023

Received March 14, 2023; Received in revised form October 25, 2023;

Accepted November 2, 2023

Информация об авторах

ГОЛОВИНА Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Information about the authors

Ekaterina V. GOLOVINA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

КАЛАЧ Андрей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1а; РИНЦ ID: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

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

Andrey V. KALACH, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Technical University, 20th Anniversary of October St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ID RISC: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 13–24
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):13-24

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 699.812

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24>

Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции

Павел Сергеевич Ланской ✉, Дмитрий Александрович Корольченко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В ходе проектирования зданий и сооружений конструктивным элементам присваиваются требуемые пределы огнестойкости в соответствии действующими нормативными документами. Проведение натурных огневых испытаний для подтверждения требуемого предела огнестойкости для каждого варианта проектируемой конструкции экономически нецелесообразно, так как огневые испытания — это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Программное моделирование огневого воздействия на конструкции является комплексной и трудоемкой задачей, в основе которой лежат фундаментальные физические законы теплотехники и механики твердого тела.

Цель. Анализ программных комплексов и определение их функциональных возможностей по моделированию и выполнению междисциплинарных прочностных расчетов для выбора наиболее подходящего для расчетов конструкций и их узлов в условиях пожара.

Задачи. Анализ основных принципов фундаментальных физических законов и их представление в методе конечных элементов, анализ достоверности результатов расчета каждого из расчетных комплексов, рекомендации по выбору программного комплекса, применяемого при расчете конструкций во время пожара.

Аналитическая часть. При анализе программных комплексов в исследовании рассматривались задачи, связанные с рассмотрением физических законов, заложенных в расчетную модель работы конструкции во время и после огневого воздействия, их интерпретации в методе конечных элементов, анализ наиболее распространенных программных комплексов, представленных на рынке и предназначенных для решения задач, связанных с механикой твердого тела и теплотехникой. Были сформулированы критерии оценки программных комплексов. По критериям оценки результаты сводились в сравнительную таблицу, на основании которой осуществляется выбор наиболее подходящего для решения конкретных задач. Был произведен анализ функциональных возможностей программных комплексов и сформулирована типовая статическая задача для расчета в каждом из ПК.

Выводы. Сравнительный анализ программных комплексов показал, что для решения задач, связанных с воздействием на строительные конструкции высоких температур во время пожара, наиболее подходящим программным комплексом является ANSYS, так как позволяет моделировать и совмещать как статическое, так и термическое воздействие.

Ключевые слова: деформации; конечно-элементное моделирование; сравнительный анализ; программное обеспечение; междисциплинарные расчеты; высокотемпературные воздействия; механика твердого тела; тепловой перенос

Для цитирования: Ланской П.С., Корольченко Д.А. Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 13–24. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24.

✉ Ланской Павел Сергеевич, e-mail: 6451187@mail.ru

Analysis of existing specialized software suitable for calculations and solving interdisciplinary tasks in modelling fire effects on building structures

Pavel S. Lanskoj ✉, Dmitriy A. Korolchenko

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

ABSTRACT

Introduction. During the engineering design, the required fire resistance limits are assigned to structural elements in accordance with current regulatory documents. However, carrying out full-scale fire tests to confirm the required fire resistance limit for each version of the designed structure is economically inexpedient, as fire tests are a labour-intensive and expensive process. Software modelling of fire effects on structures is a complex and time-consuming task, based on fundamental physical laws of heat engineering and solid mechanics.

Goals. Analysis of software complexes and determination of their functional capabilities for modelling and performing interdisciplinary analysis in order to choose the most suitable one for calculations of structures and their assemblies under fire conditions.

Tasks. Analysis of the basic principles of fundamental physical laws and their representation in the finite element method, analysis of the reliability of the calculation results of each of their calculation complexes, recommendations on the choice of a software complex used in the calculation of structures during a fire.

Analytical part. During software packages analysis, the following issues were considered: the physical laws embedded in the calculation model of the structure operation during and after fire exposure, their interpretation in the finite element method, analysis of the most common software available on the market and designed to solve problems related to solid mechanics and heat engineering. Evaluation criteria for software packages were formulated and the results were summarized in a comparative table. The choice of the most suitable software is made on the results of the comparative table. The functional capabilities of the software systems were analyzed and a typical static problem for calculation in each of the PCs was formulated.

Conclusions. The comparative analysis of software complexes showed that for solving problems related to the impact on building structures of high temperatures during a fire, the most suitable software complex is ANSYS. It allows modelling and combining both static and thermal effects.

Keywords: deformations; finite element modelling; comparative analysis; software; interdisciplinary calculations; high temperature exposure; solid mechanics; heat transfer

For citation: Lanskoj P.S., Korolchenko D.A. Analysis of existing specialized software suitable for calculations and solving interdisciplinary tasks in modelling fire effects on building structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):13-24. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24 (rus).

✉ Pavel Sergeevich Lanskoj, e-mail: 6451187@mail.ru

Введение

Стальные каркасы зачастую представляют собой набор рам, соединенных в единую пространственную систему для обеспечения жесткости и устойчивости. Прочность, жесткость и устойчивость каркаса в целом обусловлены прочностью составляющих его рам. Сами рамы являются геометрически неизменяемой системой, образованной системой колонн и балок, жестко, либо шарнирно соединенных между собой и основанием.

Точное определение жесткостей и типа соединений лежит в основе проектирования и расчета конструкции зданий и сооружений. Стоит отметить, что проектирование и расчеты выполняются в основном на восприятие эксплуатационных нагрузок и температурных диапазонов. Однако во время пожара конструкции подвергаются огневому воздействию и работают за пределами эксплуатационных температур и воздействий. В соответствии с нормативно-правовыми актами РФ, в частности 123 ФЗ ст. 35¹, к конструкциям предъявляются требования по огнестойкости: их способности сопротивляться воздействию пожара, сохраняя свои эксплуатационные характеристики в течение определенного временного интервала. Одним из признаков наступления

предела огнестойкости является потеря несущей способности.

В соответствии с ГОСТ 30247.0–94², потеря несущей способности возникает вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций, потеря целостности — в результате образования в конструкциях сквозных трещин или отверстий, потеря теплоизолирующей способности — вследствие повышения температуры на не обогреваемой поверхности конструкции до предельных для данной конструкции значений.

С точки зрения моделирования и расчета конструкций процесс потери несущей способности обусловлен несколькими факторами: изменением расчетной схемы и граничных условий — обрушение части конструкций; изменение типов закреплений и соединений конструкций — изменение свойств узлов и появление дополнительных степеней свободы; изменение жесткостей конструкций — изменение физических характеристик материалов; изменение характера нагружения конструкций — появление дополнительных усилий вследствие температурных расширений.

Стоит отметить, что огнестойкость здания и его конструкций связаны не только с обеспечением безопасной эвакуации людей при пожаре, но и со снижением влияния сопутствующих проявлений опасных

¹ ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Ст. 35 «Классификация строительных конструкций по огнестойкости».

² ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования различают основные виды предельных состояний строительных конструкций.

факторов пожара (таких как обрушение конструкций здания) в ходе ликвидации пожара. Таким образом, изучение и прогнозирование поведения несущих конструкций зданий в экстремальных условиях пожара является сложной и важной задачей.

Современное проектирование неразрывно связано с информационными технологиями, значительно упрощающими и ускоряющими сам процесс разработки проектной документации, моделирования и проверочных расчетов.

С развитием вычислительных средств появилось много программных комплексов, предназначенных для решения сложных инженерных задач.

В основе большинства расчетных комплексов лежит Метод конечных элементов (МКЭ), представляющий собой эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. Предполагается, что цельная конструкция рассматривается как совокупность отдельных конечных элементов [1].

МКЭ наиболее эффективен при возрастающих вычислительных мощностях ЭВМ, ускоряющих сложные численные расчеты. Соответственно, совершенствовались вычислительные программы, реализующие этот метод.

Основные принципы, заложенные в МКЭ [2]:

1. Любые непрерывные величины, такие как перемещение, температура, давление и пр. могут быть аппроксимированы дискретной моделью. Построение модели основано на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей — элементах (конечных элементах).

2. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном фиксируемом числе точек рассматриваемой области. Эти точки называются узлами.

3. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе функцией, которая определяется с помощью узловых значений этой величины. Непрерывность величины сохраняется вдоль границ элемента.

5. Объекты исследования могут иметь различную форму и физическую природу, будь то твердые тела, жидкости, газы или электромагнитные среды и др.

Алгоритм решения задач МКЭ при выполнении прочностных расчетов сводится к следующим этапам:

1. Построение расчетной модели.
2. Создание сетки конечных элементов.
3. Задание граничных условий расчета и назначение нагрузок.

4. Выбор физико-математической модели, описание расчетной схемы, физических характеристик ее элементов.

5. Выполнение расчетов для определения усилий в элементах и перемещений в узлах.

6. Анализ полученных результатов.

Уравнения, составляющие математическую модель, можно разбить на три группы:

- 1) статические уравнения (уравнения равновесия);
- 2) геометрические уравнения (уравнения неразрывности деформаций);

- 3) физические уравнения (уравнения, связывающие внутренние силы или напряжения с деформациями тела).

Для условий нормальной (проектной) эксплуатации в большинстве случаев прочностные расчеты выполняются в статической постановке. Но в условиях пожара в расчетах необходимо также учитывать и тепловые воздействия на конструкции. Что подразумевает решение междисциплинарной задачи.

Целью данного исследования является анализ программных комплексов и определение их функциональных возможностей по моделированию и выполнению междисциплинарных прочностных расчетов для выбора наиболее подходящего для решения задач по поведению строительных конструкций и их узлов в условиях пожара. Таким образом, для выбора оптимального программного комплекса необходимо решить следующие задачи: подобрать и проанализировать критерии оценки программных комплексов, проанализировать результаты расчетов каждого программного комплекса на примере решения типовой задачи, для оценки результатов расчета типовой задачи каждым из расчетных комплексов необходимо разобрать интерпретацию физических законов в методе конечных элементов, подготовить рекомендации по выбору программного комплекса, применяемого при расчете конструкций во время пожара.

Аналитическая часть

Физические законы, применяемые при построении и расчете математической модели каркаса при огневом воздействии

В основу всех рассматриваемых комплексов заложены основные фундаментальные физические законы, описывающие деформации тел, их контактное взаимодействие, трение, теплопередачу, линейное расширение. Все эти законы отражаются в методе конечных элементов в виде системы алгебраических уравнений (СЛАУ). Количество этих уравнений зависит от количества конечных элементов. А вид этих уравнений определен самими физическими законами.

В первую очередь закон Гука [3], согласно которому материал деформируется линейно упруго:

$$F = k\Delta l, \quad (1)$$

где F — сила, которой растягивают (сжимают) стержень;

k — коэффициент упругости (или жесткости);

Δl — абсолютное удлинение (сжатие) стержня.

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости;

$\{U\}$ — вектор перемещений (матрица-столбец);

$\{F\}$ — вектор нагрузок (матрица-столбец).

Второй закон, в котором заложены основные фундаментальные физические законы, контактное взаимодействие [4] — это метод множителей Лагранжа [5].

К потенциальной энергии системы двух тел, входящих в контакт, добавляется потенциал контактных сил вида:

$$W_c = \int_{\Gamma_c} \Lambda(x^{(1)} - x^{(2)}) d\Gamma, \quad (3)$$

где Γ_c — поверхность контакта между телами B_1 и B_2 ;

Λ — функция множителей Лагранжа, имеющая смысл вектора поверхностных контактных сил;

$x^{(i)} = X^{(i)} + u^{(i)}$ — актуальные положения соответствующих сходственных точек тел ($i = 1, 2$) на поверхности контакта;

$X^{(i)}$ — исходные положения сходственных точек;

$u^{(i)}$ — получаемые перемещения сходственных точек.

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ:

$$\begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 & L_1 \\ & L_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \Lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ G \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где K_1 и K_2 — матрицы жесткости, получаемые с помощью МКЭ для упругой деформации 1 и 2-го тела соответственно;

L_1, L_2 — добавочные блоки, соответствующие множителям Лагранжа;

$U_i = \{u_1^{(i)}, \dots, u_{N_i}^{(i)}\}T$ — вектор узловых перемещений для i -го тела, $i = 1, 2$;

$F_i = \{f_1^{(i)}, \dots, f_{N_i}^{(i)}\}T$ — вектор внешних сил для i -го тела, $i = 1, 2$;

$\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ — дискретизированные множители Лагранжа;

$G = \{g_1, \dots, g_m\}$ — разрывы, соответствующие парам контактных узлов;

m — число контактных пар.

Третий закон — это закон Кулона, трение между элементами. В случае контакта на совместной границе контактирующих тел возникают распределенные поверхностные силы, обозначаемые $\mathbf{t}$. Нормальная и касательная составляющие распределенной контактной силы, действующей на любое из тел, имеют вид:

$$\begin{aligned} m &= \mathbf{t} \cdot \mathbf{n} \leq 0; \\ tt &= \mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к контактной поверхности данного тела;

$\boldsymbol{\tau}$ — касательный вектор к контактной поверхности тела.

На контактной поверхности могут быть поставлены условия одного из следующих типов:

1. Скольжение без трения. В случае, если на контактной поверхности реализуется условие скольжения без трения, касательные контактные силы принимаются равными нулю:

$$tt = 0. \quad (6)$$

2. Прилипание. Если на контактной поверхности имеет место прилипание, то касательные контактные силы не зависят от нормальных контактных сил, но и не равны нулю.

3. Трение. Касательные контактные силы подчиняются закону Кулона, т.е. контактирующие тела неподвижны друг относительно друга до тех пор, пока выполняется неравенство:

$$|tt| \leq \mu_s |m|, \quad (7)$$

где $\mu_s > 0$ — статический коэффициент трения.

Следующее фундаментальное уравнение — это уравнение теплопроводности — закон Фурье [6]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (8)$$

где q — величина теплового потока, Дж/(м²·с);

T — температура; коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·К).

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ [7]:

$$[K]\{T\} = \{F\}, \quad (9)$$

где $[K]$ — глобальная матрица теплопроводности (жесткости);

$\{T\}$ — температура в узле (матрица-столбец);

$\{F\}$ — граничное условие (матрица-столбец).

При решении нестационарной задачи теплопроводности в уравнение равновесия включается матрица теплопоглощения (демпфирования) C :

$$KT + C \frac{\partial}{\partial t} T = F. \quad (10)$$

И, наконец, основной закон теплового расширения. Изменение линейных размеров и формы тела при изменении его температуры:

$$\Delta L = \alpha L \cdot \Delta T, \quad (11)$$

где ΔL — величина;

αL — величина;

ΔT — величина.

Вышеперечисленные фундаментальные физические законы применяются для решения прикладных задач [8], связанных как с механикой твердого тела, так и с теплопереносом.

Ввиду того что в условиях пожара конструкции подвержены термическому воздействию, существенно превышающему стандартные эксплуатационные значения, важно учитывать влияние тепловых воздействий на конструкции и их элементы. Таким образом, при огневом воздействии проверочные расчеты несущей способности конструкций сводятся к решению междисциплинарной задачи.

Описание наиболее распространенных программных комплексов, пригодных для статических и теплотехнических расчетов

В данном исследовании рассматриваются следующие расчетные комплексы:

1. ABAQUS UNIFIED FEA.
2. ANSYS.
3. Autodesk Inventor Nastran.
4. Robot Structural Analysis Professional.
5. SCAD.
6. ЛИРА 10.

ABAQUS — универсальный многоцелевой программный комплекс общего назначения, предназначенный для междисциплинарного анализа в областях общей механики, машиностроения, электроники и автомобилестроения [9–11], состоящий из различных модулей, предназначенных для решения задач методом конечных элементов с учетом нелинейности свойств материалов и контактного взаимодействия тел.

Модуль Abaqus/Standard используется для анализа напряжений и перемещений в статической и динамической постановках, теплопередачи, диффузии масс, а также определения вязкоупругого и вязкопластического отклика.

Модуль Abaqus/Explicit применяется при расчетах и анализе кратковременных динамических и квазистатических процессов; анализа термопроч-

ности; определения общего контакта; взрывных воздействий [12]^{3,4}.

Модуль Abaqus/Design позволяет решать задачи, связанные с чувствительностью конструкции к геометрическим изменениям.

Модуль Abaqus/Aqua направлен на расчет подводных и надводных сооружений.

В программном комплексе ABAQUS реализована возможность выполнять междисциплинарные расчеты: механика твердого тела — тепловой перенос (возможно как последовательное, так и полностью сопряженное решение); тепловой перенос — электричество; поток в пористой среде — механика твердого тела; напряжения — диффузия массы; пьезоэлектрика; акустика — вибрации.

ANSYS — универсальный многоцелевой программный комплекс, в основу которого заложен метод конечных элементов. В состав комплекса входит 30 модулей, предназначенных для решения различных узконаправленных задач при помощи математических моделей, описывающих конкретные физические явления и численные методы их решения. Инструментами для проведения расчетного анализа являются [2, 13]:

1. Fluid Mechanics — решение задач, связанных с течением жидкости и газа.
2. Structural Mechanics — решение задач динамики и прочности.
3. Electromagnetics — решение задач, связанных с работой различных компонентов радиоэлектроники, систем автоматики, электрических машин и приборостроения.

Реализовано решение междисциплинарных задач на основании комплексной связки нескольких типов решателей. Расчетные модули, соответствующие определенным инструментам, сведены в табл. 1.

Взаимосвязь и передачу необходимой информации между приложениями с разными видами анализа осуществляет платформа Workbench, она также демонстрирует последовательность расчетов, их систематизацию и хранение.

Autodesk Robot Structural Analysis [14] — программа, в основу которой заложен метод конечных элементов, предназначенная для решения задач по механике твердого тела.

³ Лавриненков А.Д., Якимов И.Д., Левадный Е.В., Бойко А.Б., Остапов А.В., Зигинов Н.В. Электронное методическое пособие «SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач». Ч. 1. М.: ТЕСИС, 2015. 121 с. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_apptask.pdf

⁴ Крючков А.Э., Арсланова Л.И., Дияров К.А., Маликов П.В., Мальгин М.Г., Самигуллина Л.Г. и др. Электронное методическое пособие «SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач». Ч. 2. М.: ТЕСИС, 2018. 160 с. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/Abaqus_apptask2.pdf

Таблица 1. Расчетные модули
Table 1. Calculation modules

Механика жидкости Fluid Mechanics	Fluent, CFX, Icepak, CFD-Flow, Vista TF, Icem CFD, TurboGrid, TGrid, BladeModeler, CFD-Post
Структурная механика Structural Mechanics	Static Structural, Transient Structural, Rigid Dynamics, Steady-State Thermal, Transient Thermal, Linear Buckling, nCode, Harmonic Response, Random Vibration, Modal, Response Spectrum, Explicit Dynamics/AUTODYN
Электро-магнетизм Electromagnetics	Maxwell, RMXprt, PEXprt, Simplorer

Программный комплекс позволяет выполнять статический расчет (линейный и нелинейный), динамический расчет (расчет форм колебаний, гармонический, сейсмический, спектральный, временной), анализ предельного равновесия.

Одной из отличительных особенностей программного комплекса является прямая двусторонняя связь с программой Autodesk Revit, что позволяет существенно упростить процесс подготовки расчетной модели при комплексном проектировании зданий и сооружений.

Autodesk Inventor Nastran⁵ — программный комплекс, основанный на методе конечных элементов, применяется для расчетов задач механики твердого деформируемого тела, устойчивости, динамических и нелинейных процессов, определения собственных и критических частот и форм колебаний, анализа контактных взаимодействий, аэроупругости, а также для решения задач теплопереноса и акустики⁵. Не имеет собственного графического редактора, он интегрируется в CAD-системы Autodesk Inventor⁵ и Solidworks.

Ключевой особенностью является интеграция в системы проектирования Autodesk Inventor и Solidworks, что упрощает процесс создания геометрии и моделирования.

Задачи, которые позволяет рассчитывать программный комплекс Autodesk Nastran in-cad: линейный статический анализ; расчет устойчивости; стационарный тепловой расчет; расчет композитных материалов; модальный анализ; модальный анализ с учетом предварительной нагрузки; расчет сборок с условиями контакта; расчет температурных напряжений; нелинейный статический анализ; нестационарный тепловой расчет; расчет вынужденных колебаний; расчет динамических нагрузок; тепловой расчет с нелинейными граничными условиями; отклик на случайные

частотные нагрузки; учет пластических и гиперупругих свойств материалов; расчет падения тела.

SCAD (Structure CAD) [15] — программный вычислительный комплекс, предназначенный для решения задач механики твердого тела. В его основу заложен метод конечных элементов, позволяющий определить напряженно-деформированное состояние конструкций от статических и динамических воздействий.

Программный комплекс состоит из следующих программ/модулей [16]:

1. Расчет и проектирование металлических конструкций — КРИСТАЛЛ, СЕЗАМ, КОМЕТА.
2. Расчет и проектирование оснований и фундаментов — КРОСС, ОТКОС, ЗАПРОС.
3. Расчет и проектирование каменных конструкций — КАМИН.
4. Расчет и проектирование монолитных конструкций — АРБАТ, МОНОЛИТ.
5. Расчет и проектирование деревянных конструкций — ДЕКОР.
6. Расчет и проектирование сечений — ТОНУС, КОНСУЛ, Конструктор сечений.
7. Модуль КоКон — Электронный справочник для определения коэффициентов концентрации напряжений.

8. Модуль BeCT предназначен для расчета нагрузок по СП 20.13330–2016⁶.

9. Модуль SCAD Office предназначен для проектирования стальных и железобетонных конструкций.

ЛИРА — программный комплекс, предназначенный для проектирования и расчета конструкций различного назначения. В основе расчетного комплекса лежит метод конечных элементов, позволяет производить расчеты и вычисления в различных областях механики, машиностроения и строительства [17].

Производимые расчеты: прочность и устойчивость; железобетонные здания и сооружения; металлические конструкции; деревянные конструкции; мосты и трубы; строительство в сейсмически активных районах; расчет нестандартных сечений.

Специальные возможности: расчет на статические и динамические нагрузки; геометрически и физически нелинейные расчеты; расчеты с учетом поэтапного возведения конструкций; расчет плитных, ленточных и свайных фундаментов; расчет фильтрации; решение задачи теплопроводности; вариантное проектирование; расчет с учетом динамики во времени.

Задачи, которые программный комплекс ЛИРА 10 позволяет рассчитывать и анализировать: линейные и нелинейные статические задачи; линейные задачи в динамической постановке, представленной в виде собственных форм колебаний; определять упруго-

⁵ Autodesk Nastran 2024: Nonlinear Analysis Handbook. © Autodesk, Inc., 2023. С. 38, 636, 58.

⁶ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.

геометрические характеристики поперечных сечений стержней; выполнять расчеты температурных полей и проводить вычисления фильтрации в насыщенном влагой грунте.

Расчеты в программных комплексах ANSYS, Autodesk Inventor Nastran, SCAD, Robot Structural Analysis Professional

В рамках данного исследования был выполнен расчет плоской рамы следующего вида (рис. 1).

По сортаменту СТО АСЧМ 20–93⁷ и ТУ 0925-036-00186269–2016⁸.

Материалом конструкции принята сталь марки С245 по сортаменту: «Прокат, использующий статистическую процедуру контроля его свойств»⁹ (кроме классов С590, С590К).

Узлы сопряжения колонн с балками приняты жесткими.

Колонны жестко сопряжены с основанием: перемещения и поворот исключены.

К раме приложены следующие нагрузки:

- собственный вес конструкций;
- сосредоточенная нагрузка величиной в 10,8 кН, приложенная к середине пролета балки.

Расчетная схема представлена на рис. 2.

Результаты расчета программного комплекса ANSYS даны на рис. 3.

Результаты расчета программного комплекса Autodesk Inventor Nastran показаны на рис. 4.

Результаты расчета программного комплекса SCAD представлены на рис. 5.

Результаты расчета программного комплекса ЛИРА 10 показаны на рис. 6.

Результаты расчета программного комплекса Robot Structural Analysis Professional даны на рис. 7.

Для равных начальных условий рассматриваемая плоская рама был смоделирована в программе Advance Steel и экспортирована в рассматриваемые расчетные программные комплексы.

Рассматриваемые программные комплексы можно разделить на две группы по принципу построения расчетной модели: 1-я группа — основанные на стержневых моделях: SCAD; ЛИРА 10; Robot Structural Analysis Professional; 2-я группа — основанные на твердотельных моделях: Autodesk Inventor Nastran; Ansys; ABAQUS UNIFIED FEA.

Так как принципы построения расчетных моделей и разбиения их на сетки конечных элементов

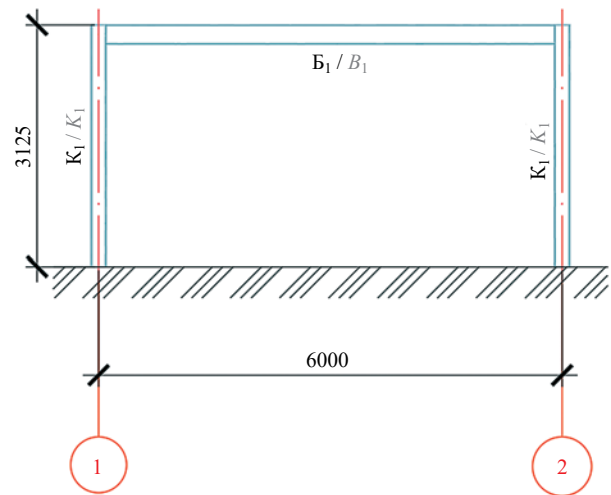


Рис. 1. Типовая стальная рама: B_1 — двутавр прокатный 25Б2; K_1 — двутавр прокатный 20К2

Fig. 1. Standard steel frame: B_1 — rolled I-beam 25B2; K_1 — rolled I-beam 20K2

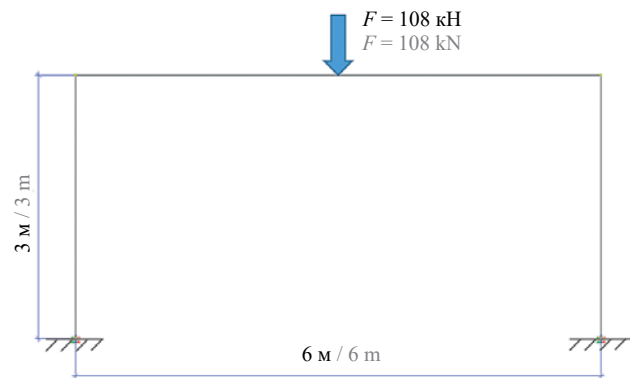


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Calculation scheme

у программных комплексов различаются (стержневые и твердотельные модели), количество конечных элементов существенно разнится. Стержневая модель является упрощенным представлением реальной конструкции, в то время как твердотельная модель наиболее достоверно отображает ее поведение за счет большего количества конечных элементов.

Ввиду вышеупомянутого различия в количестве конечных элементов и точности получаемых результатов в данной работе сравниваются максимальные значения перемещений конструкции и характер/форма деформации.

Стоит отметить, для импортированной из Advance Steel трехмерной модели расчетный комплекс ABAQUS UNIFIED FEA создает непригодную для дальнейших расчетов сетку конечных элементов и прерывает вычисления.

При решении типовой задачи максимальные перемещения для комплексов составили:

- SCAD — 22,272 мм;
- ЛИРА 10 — 22,277 мм;

⁷ СТО АСЧМ 20–93. Прокат стальной сортовой фасонного профиля.

⁸ ТУ 0925-036-00186269–2016. Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок дополнительных размеров к типам по СТО АСЧМ 20–93.

⁹ ГОСТ 27772–88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.

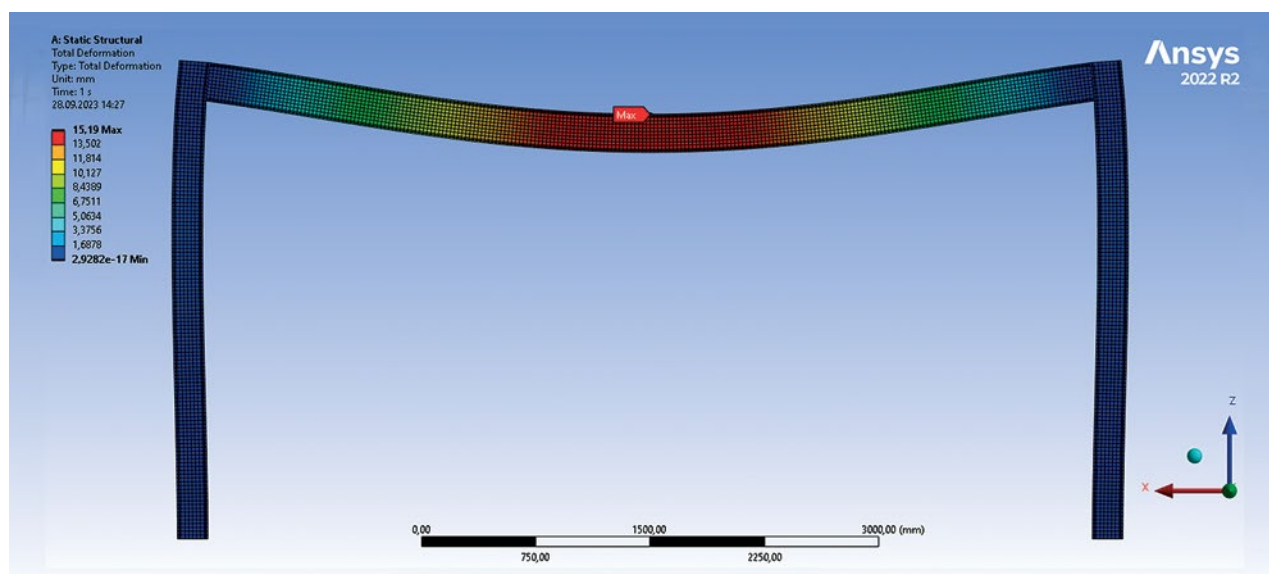


Рис. 3. Карта перемещений (расчет в ANSYS)

Fig. 3. Displacement map (ANSYS calculation)

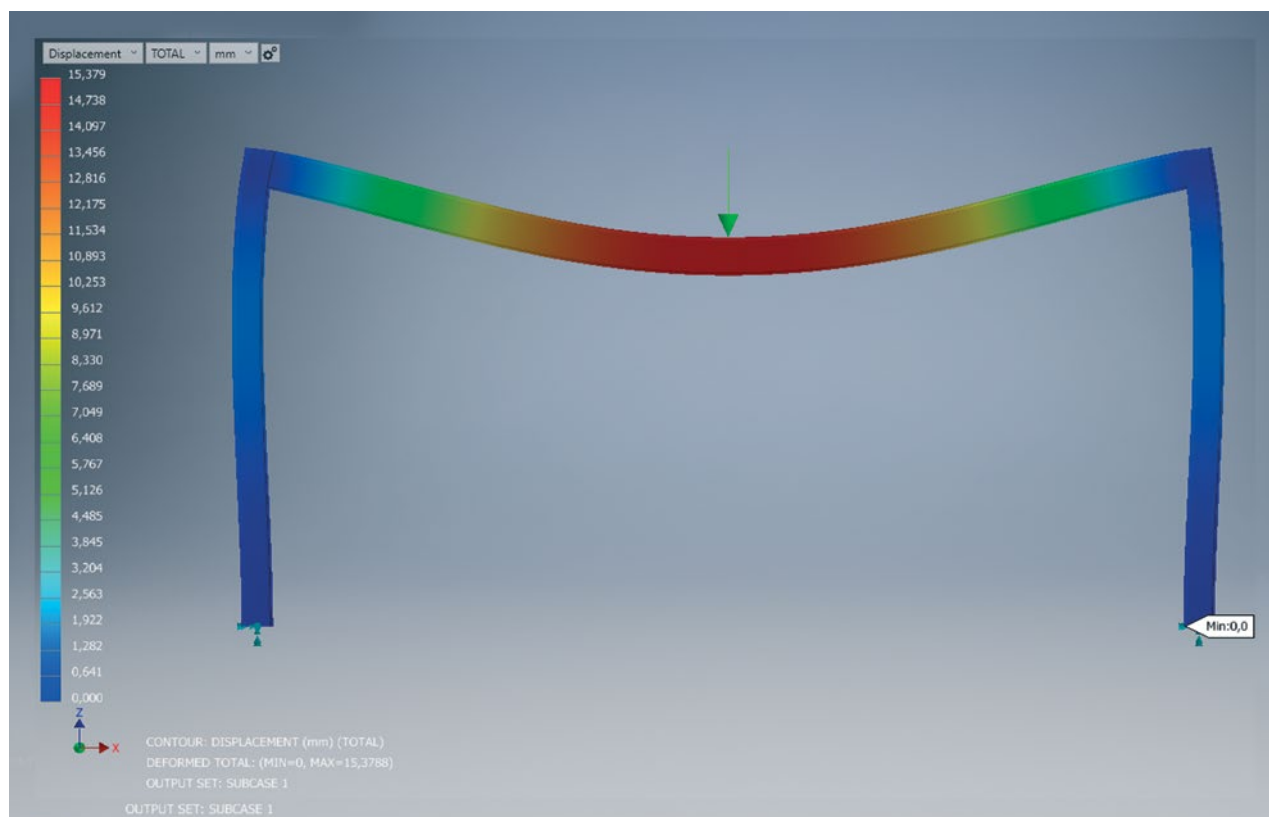


Рис. 4. Карта перемещений (расчет в Autodesk Inventor Nastran)

Fig. 4. Displacement map (Autodesk Inventor Nastran calculation)

- Robot Structural Analysis Professional — 22,728 мм;
- Autodesk Inventor Nastran — 15,379 мм;
- Ansys — 15,19 мм.

Отличие в результатах: Ansys — 15,19 мм; Autodesk Inventor Nastran — 15,37 связано с различиями в алгоритме разбиения модели на сетку конечных элементов.

Результаты расчетов идентичны внутри каждой группы и существенно отличаются в сравнении с результатами расчетов между разными группами.

Среднее квадратичное отклонение для результатов первой группы расчетных комплексов составляет 0,263272.

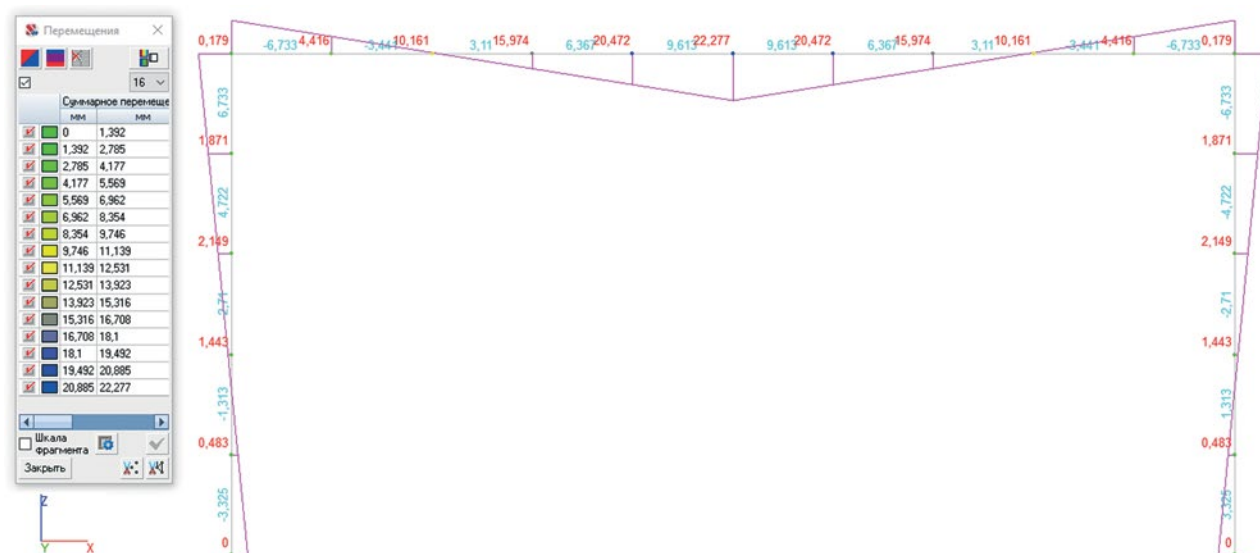


Рис. 5. Карта перемещений (расчет в SCAD)

Fig. 5. Displacement map (SCAD calculation)

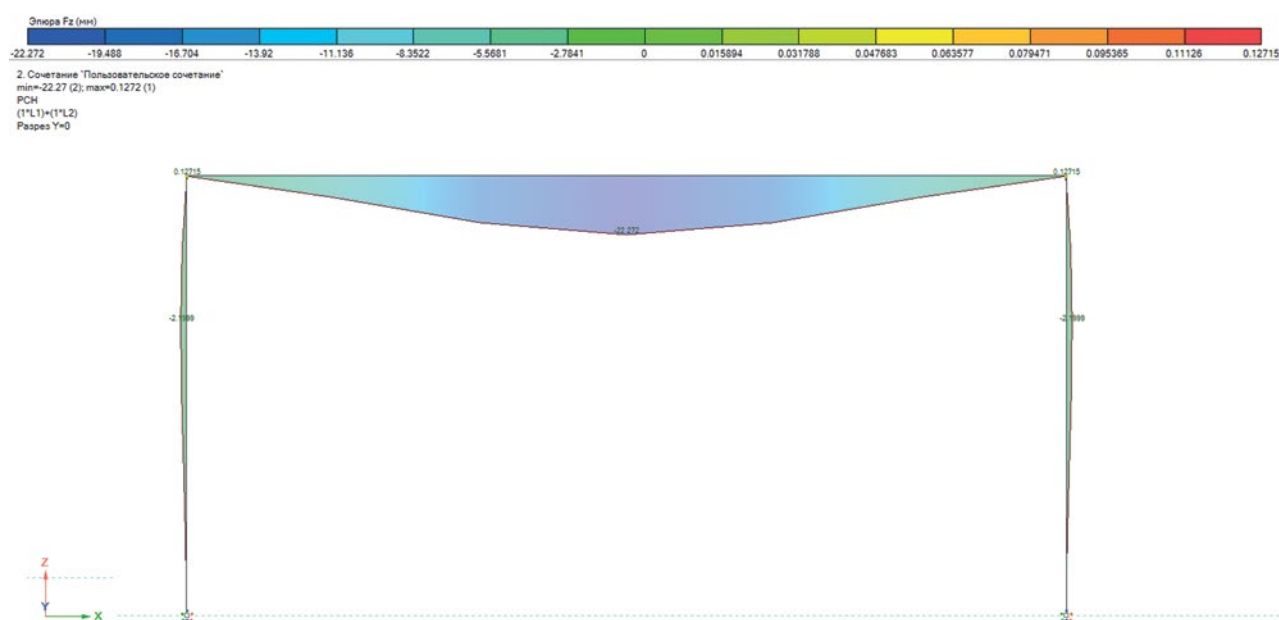


Рис. 6. Карта перемещений (расчет в ЛИРА 10)

Fig. 6. Displacement map (LIRA 10 calculation)

Среднее квадратичное отклонение для результатов второй группы расчетных комплексов составляет 0,127279.

Различие в результатах для первой и второй групп расчетных комплексов обусловлено принципиальным отличием в типе и количестве конечных элементов.

Критерии оценки программных комплексов

В данном исследовании предлагаются следующие критерии оценки [18]:

1. Оценка возможности выполнения прочностных расчетов (механика твердого тела).

2. Оценка возможности выполнения теплотехнических расчетов (теплоперенос).

3. Оценка возможности выполнения расчетов междисциплинарных расчетов — поочередных расчетов с учетом полученных ранее результатов решения как задач по механике твердого тела, так и теплотехнической задачи.

4. Оценка доступности учебно-методической документации для освоения программного комплекса.

5. Оценка простоты использования и освоения программного комплекса.



Рис. 7. Карта перемещений (расчет в Robot Structural Analysis Professional)

Fig. 7. Displacement map (Robot Structural Analysis Professional calculation)

Сравнение функциональных возможностей различных расчетных комплексов

Функциональные возможности рассмотренных программных комплексов сведены в сравнительную табл. 2 по ключевым критериям оценки.

Таблица 2. Сравнение функциональных возможностей расчетных различных комплексов

Table 2. Comparison of the functional capabilities of different calculation complexes

Наименование программного комплекса Software name	Решение задач механики твердого тела Solid state mechanics computing	Решение задач теплопереноса Thermostatic and heat transfer computing	Междисциплинарные расчеты Interdisciplinary computing	Наличие учебно-методической документации User guides and manuals	Простота использования Usability
ABAQUS UNIFIED FEA	+	+	+	+	—
ANSYS	+	+	+	+	+
Autodesk Inventor Nastran	+	+	+	—	+
Robot Structural Analysis Professional	+	—	—	+	+
SCAD	+	—	—	+	+
ЛИРА 10 LIRA 10	+	+	—	+	+

Выводы

В ходе исследования были рассмотрены основные физические законы и их интерпретация при использовании решения задач методом конечных элементов. Рассмотрен МКЭ, заложенный в основу рассматриваемых программных комплексов.

При анализе программных комплексов в каждом из них был выполнен расчет типовой рамы и получены численные результаты по деформациям и перемещениям. Рассмотренные программные комплексы были разделены на две группы по типу используемых конечных элементов, их количеству и полученным результатам.

Проанализированы функциональные возможности рассматриваемых в исследовании программных комплексов. Определена их применимость в рамках решения междисциплинарной задачи.

Была выполнена оценка программных комплексов по сформулированным критериям оценки программного обеспечения, результаты были сведены в сравнительную табл. 2.

Проведя сравнительный анализ программных комплексов, можно выделить ANSYS как наиболее подходящий для прочностных расчетов конструкций и их узлов в условиях пожара. Комплекс позволяет решать задачи, связанные с междисциплинарными расчетами с учетом физической нелинейности материалов.

В рамках дальнейших исследований целесообразно сравнить результаты расчетов с натурными испытаниями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : МИР, 1979. 392 с.
2. Пронин В.А., Жигновская Д.В., Цветков В.А. Введение в расчетную платформу ANSYS Workbench: Лабораторные работы. Часть 1 : учебное пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2019. 46 с.
3. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела : учебное пособие. Н. Новгород : ННГАСУ, 2012. 73 с.
4. Галанин М.П., Прошунин Н.Н., Родин А.С. Численное решение динамической задачи контакта упругопластических тел // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 139. 31 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-139
5. Лукин В.В., Соломенцева П.В. Модификация метода множителей Лагранжа с независимой контактной границей для моделирования контакта упругих тел // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 70. 26 с. DOI: 10.20948/prepr-2020-70
6. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса : учебное пособие. Томск : ТГУ, 2016. 92 с.
7. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Никулин С.С., Антонов А.О. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов : учебное пособие. Тамбов : ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2014. 80 с.
8. Каменев С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях : учебное пособие. Оренбург : ОГУ, 2019. 110 с.
9. Фёдорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. М. : ДМК Пресс, 2017. 210 с.
10. Rahnavard R., Siahpolo N., Naghavi M., Hassanipour A. Analytical study of common rigid steel connections under the effect of heat // Advances in Civil Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. DOI: 10.1155/2014/692323
11. Zhou Q., Li J., Dong Z., Han F. Temperature field analysis of light steel structure beam-column composite joint // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1578. P. 012240. DOI: 10.1088/1742-6596/1578/1/012240
12. Рыжов С.А., Ильин К.А., Тропкин С.Н., Нуштаев Д.В., Бородин А.К. и др. SIMULIA Abaqus. Начало работы : учебное пособие. М. : ТЕСИС, 2021. 287 с.
13. Majeed A. Ansys software for mechanical engineering. Faridabad : Manav Rachna International University, 2022. P. 105. DOI: 10.13140/RG.2.2.18076.97927
14. Marsh K. Robot structural analysis: Making the change. Somerville : Marsh API LLC, 2015. 98 p.
15. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Фиалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. М. : Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 656 с.
16. Теплых А.В., Ожогин Р.Б. Новые возможности SCAD Office 21.1.9.5 // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 43–47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47
17. Ковальчук О.А., Колесников А.В., Русанова Е.М., Суворов Р.Н. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4 : учебное пособие. М. : МИСИ – МГСУ, 2015. 185 с.
18. Еремينا Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 44–53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53

REFERENCES

1. Segerlind L. *Application of the finite element method*. Moscow, MIR Publ., 1979; 392. (rus).
2. Pronin V.A., Zhignovskaya D.V., Tsvetkov V.A. *Introduction to the ANSYS Workbench computing platform : Laboratory work. Part 1 : textbook*. St. Petersburg, ITMO University, 2019; 46. (rus).
3. Makovkin G.A., Likhacheva S.Yu. *Application of FEM to solving problems in mechanics of a deformable solid : textbook*. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2012; 73. (rus).
4. Galanin M.P., Proshunin N.N., Rodin A.S. Numerical solution of the dynamic contact problem of elasto-plastic bodies. *Keldysh Institute Preprints*. 2018; 139:1-31. DOI: 10.20948/prepr-2018-139 (rus).
5. Lukin V.V., Solomentseva P.V. Modification of the Lagrange multiplier method with an detached contact boundary for modeling the contact of elastic bodies. *Keldysh Institute Preprints*. 2020; 70:1-26. DOI: 10.20948/prepr-2020-70 (rus).
6. Krainov A.Yu., Minkov L.L. *Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer : textbook*. Tomsk, TSU, 2016; 92. (rus).
7. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Nikulin S.S., Antonov A.O. *Solving heat conduction problems using the finite element method : textbook*. Tambov, FSBEI HPE “TSTU”, 2014; 80. (rus).
8. Kamenev S.V. *Fundamentals of the finite element method in engineering applications : textbook*. Orenburg, OSU, 2019; 110 (rus).

9. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Basics of work in ANSYS 17*. Moscow, DMK Press, 2017; 210. (rus).
10. Rahnavard R., Siahpolo N., Naghavi M., Hassanipour A. Analytical study of common rigid steel connections under the effect of heat. *Advances in Civil Engineering*. 2014; 2014:1-10. DOI: 10.1155/2014/692323.
11. Zhou Q., Li J., Dong Z., Han F. Temperature field analysis of light steel structure beam-column composite joint. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1578:012240. DOI: 10.1088/1742-6596/1578/1/012240
12. Ryzhov S.A., Ilyin K.A., Tropkin S.N. et al. *SIMULIA Abaqus. Getting started : tutorial*. Moscow, TESIS, 2021; 287 (rus).
13. Majeed A. *Ansys Software for Mechanical Engineering*. Faridabad, Manav Rachna International University, 2022; 105. DOI: 10.13140/RG.2.2.18076.97927
14. Marsh K. *Robot Structural Analysis: Making the Change*. Somerville, Marsh API LLC, 2015; 98.
15. Karpilovsky V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A. et al. *SCAD Office. Computer complex SCAD*. Moscow, Publishing house SKAD SOFT, 2011; 656 (rus).
16. Teplykh A.V., Ozhogin R.B. New features of SCAD Office 21.1.9.5. *Industrial and civil construction*. 2020; 4:43-47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47 (rus).
17. Kovalchuk O.A., Kolesnikov A.V., Rusanova E.M., Suvorov R.N. *Introduction to the LIRA 10.4 software package : textbook*. Moscow, MISS – MGSU, 2015; 185. (rus).
18. Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Overview of software designated for the analysis of fire resistance of building structures exposed to various fire models. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):44-53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53 (rus).

Поступила 31.10.2023, после доработки 13.11.2023;
принята к публикации 17.11.2023

Received October 31, 2023; Received in revised form November 13, 2023;
Accepted November 17, 2023

Информация об авторах

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

ЛАНСКОЙ Павел Сергеевич, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 9558-9900; ResearcherID: JOP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

Pavel S. LANSKOY, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 9558-9900; ResearcherID: OP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 25–35
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):25-35

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 681.5:658.5

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.25-35>

Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности с применением цифровых двойников объектов ТЭК

Илья Вадимович Самарин ✉, Владислав Валерьевич Кухарский

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведение комплексов мероприятий пожарной безопасности является одной из основных задач лиц, принимающих решения (ЛПР). Поддержка их деятельности выполняется с помощью автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности (АСПВБ), в подсистему программного обеспечения которых в настоящее время все чаще включаются цифровые двойники. Их использование позволяет проводить моделирование различных, в том числе предпожарных, ситуаций. ЛПР всегда должны учитывать влияние на их развитие действий персонала АСПВБ при выполнении соответствующей ситуации комплекса мероприятий. Однако в поставляемых версиях цифровых двойников требуемых расчетов нет, что заставляет восполнять подобные пробелы. Статья посвящена расчетам оценки влияния человеческого фактора на проведение комплексов мероприятий ПБ и обоснованным допускам по их корректировке.

Методы. Для решения поставленной задачи в статье проводится анализ иерархий, позволяющий более детально определить структуру принимаемых ЛПР решений в области пожарной безопасности. Выбраны два варианта структурной организации объектов, каждый из которых представляет собой дерево с различным числом листьев и ветвей. Структурные схемы объектов позволяют формулировать типы задач и направления для формирования комплексов мероприятий по обеспечению пожарной безопасности. Комплексы мероприятий для конкретных участков объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) формируются ЛПР в ходе дальнейшего уточнения их структуры.

Расчеты. Расчет регламентированного и реального времени выполнения комплексов мероприятий пожарной безопасности отдельного участка объекта ТЭК проводится на основе оценочных времен для каждого из мероприятий в комплексе. На основе полученных значений определяется интегральная степень их завершенности.

Результаты. Общее время мероприятий необходимо определять либо через данные о развитии опасных ситуаций за несколько лет, либо с помощью моделирования в цифровых двойниках.

Выводы. Включение в подсистемы программного, информационного и математического обеспечения АСПВБ расчетов интегральной степени завершенности комплексов мероприятий по обеспечению пожарной безопасности даст ЛПР возможность оперативнее реагировать на возникновение опасных ситуаций.

Ключевые слова: анализ иерархий объектов; принятие решений; планы пожарной безопасности; интегральная оценка комплексов мероприятий; степень завершенности выполнения мероприятия персоналом

Для цитирования: Самарин И.В., Кухарский В.В. Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности с применением цифровых двойников объектов ТЭК // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 25–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.25-35

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

Taking into account the human factor influence in automated fire and explosion safety systems using digital twins of fuel and energy facilities

Ilya V. Samarin ✉, Vladislav V. Kukharskiy

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The implementation of fire safety measures is one of the main tasks of decision makers (DM). Their activities are supported by automated fire and explosion safety systems (AFES), whose software subsystems are

now increasingly incorporating digital twins. Their use allows modelling of various, including pre-fire, situations. The DM should always take into account the influence of their actions of the AFES personnel on their development when carrying out the appropriate set of measures. However, the supplied versions of digital twins do not contain the required calculations, which makes it necessary to fill in such gaps. The article is devoted to calculations of the human factor influence assessment on the implementation of the complexes of industrial safety measures and reasonable tolerances for their adjustment.

Methods. To solve this problem, the article analyzes hierarchies, which allows to define in more detail the structure of decisions made by the DM in the field of fire safety. Two variants of structural organization of objects are chosen, each of which represents a tree with a different number of leaves and branches. Structural schemes of objects allow to formulate types of tasks and directions for formation of complexes of measures to ensure fire safety. Complexes of measures for specific areas of fuel and energy complex facilities are formed by the DM in the course of further specification of their structure.

Calculations. Calculation of regulated and real time of performance of complexes of measures of fire safety of a separate site of the object of fuel and energy complex is carried out on the basis of estimated times for each of the measures in the complex. On the basis of the obtained values, the integral degree of their completion is determined.

Results. The total time of events should be determined either through data on the development of dangerous situations over several years, or by modelling in digital twins.

Conclusions. Inclusion of calculations of integral degree of completeness of complexes of measures to ensure fire safety in the subsystems of software, information and mathematical support of the AFES will give the DM the possibility to react more quickly to the occurrence of dangerous situations.

Keywords: analysis of hierarchies of objects; decision-making; fire safety plans; integral evaluation of complexes of measures; degree of completion of the event by the staff

For citation: Samarin I.V., Kukharskiy V.V. Taking into account the human factor influence in automated fire and explosion safety systems using digital twins of fuel and energy facilities. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):25-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.25-35 (rus).

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

Введение

Характер работы объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) требует от их руководителей предельно внимательного отношения к решению проблем пожарной безопасности (ПБ). Забота о предотвращении пожароопасных ситуаций — одна из важных задач, выполняемых ими при непосредственном управлении такими объектами. Повышение объемов производимой на объектах ТЭК продукции и интенсификация всех связанных с этим процессов требует повышения качества мониторинга параметров различных видов деятельности и данных об окружающей среде. Предоставляемые лицам, принимающим решения (ЛПР), возможности в этом направлении предусматривали применение средств автоматизации и программного обеспечения (ПО), включаемых в автоматизированные системы (АС) пожаровзрывобезопасности (АСПВБ) [1]. Сами АСПВБ являются подмножествами АС управления предприятиями (АСУП) или технологическими процессами (АСУТП).

Внедрение данных возможностей в специальное ПО (СПО) АСПВБ до настоящего времени осуществлялось с помощью традиционных инструментальных средств разработки программ (сервисов или приложений). Это же касалось и интеграции АСПВБ с другими территориальными и объектовыми системами безопасности и жизнеобеспечения.

Учитывая ограничения в способности человека реагировать на проблемные вызовы в случаях, когда они начинают происходить массово и одновре-

менно, а также обилие применяемых в подсистеме ПО АСПВБ разнородных сервисов и приложений, динамика изменения обстановки на объектах ТЭК потребовала появления новых средств помощи в выдаче ЛПР управляющих воздействий в сложных обстоятельствах. Связанные с человеком АС не всегда позволяли это делать. Поэтому в АСПВБ применялся механизм приоритизации в последовательности управляющих мероприятий, основанный на анализе факторов влияния на ПБ [2].

На каждом из этапов развития информационных технологий (ИТ) в подсистему ПО АСПВБ внедрялись различные платформы. Их использование базировалось на математических методах, включаемых в подсистемы информационного и математического обеспечения упомянутой АС. Долгое время с этой целью использовались процедурные и объектно-ориентированные языки программирования (ЯП).

Применение цифровых двойников (Digital Twins — DT) для обеспечения ПБ — тема последних нескольких лет. Новые средства создают виртуальную копию объекта ТЭК, достоверно воспроизводящую и задающую состояние в режиме реального времени оригинала и всех процессов в нем [3, 4]. Их появление стало результатом развития PLM-технологий (Product Lifecycle Management — процесс управления жизненным циклом любого производимого продукта (сырья, материала, детали, узла, агрегата, услуги и т.п.); включает в себя замысел, проектирование, производство (если есть), сопровождение или обслуживание, утилизацию (если есть) или развитие и процедуры прекра-

жения использования. Объединяет в себе персонал, данные, алгоритмы работы, процессы, организации и управление ими), применявшихся на протяжении последних 20 лет для управления данными о продукте, его жизненным циклом, используемыми для этого программами и проектами, его качеством, а также охраной окружающей среды и труда занятых его производством работников [5–7]. Но если PLM давала информацию о фактическом состоянии продукта (детали или сборочной единицы), то цифровые двойники «дают возможность симитировать множество вариантов полных и частичных сбоев, амортизацию работающих механизмов и деталей, функционирование устройства с учетом различных режимов, а также влияние окружающей среды» [3]. Поэтому их внедрение в АСПВБ — крайне важная и актуальная задача.

Использование данной технологии для отдельных составных элементов обеспечения ПБ уже происходит [7]. Но комплексного ее применения для моделирования процессов ПБ в АСПВБ пока не произошло. Внедрение на объектах ТЭК цифровых двойников АСПВБ — сложная и многогранная задача, требующая объединения усилий многих специалистов в различных областях. При этом важной составляющей данного процесса служит применение цифровых двойников в том числе как для оценки качества стратегического планирования, так и для оперативной корректировки планов мероприятий по предупреждению опасных ситуаций исходя их конкретных условий обстановки.

Основополагающим документом, закладывающим фундамент стратегического планирования, является закон 172-ФЗ¹. Согласно ст. 7, в основу данного вида деятельности должны быть положены принципы преемственности, непрерывности, результативности и эффективности. В применении к ПБ на объектах ТЭК это означает, что ЛПР и его помощники постоянно следят за ее обеспечением. Учитывая, что вся деятельность в предотвращении опасных и предпожарных ситуаций дискретна, как разработка планов профилактических мероприятий, а обстановка на объектах развивается по многим направлениям непрерывно, в АС с применением ДТ следует разработать ряд дополнительных новых нестандартных цифровых моделей по корректировке мероприятий и планов. В этих моделях следует ввести агрегатные показатели качества и завершенности необходимых мероприятий с учетом отсутствия по ряду направлений регламентов «межведомственного взаимодействия в процессах разработки, реализации и корректировки документов» [8].

Методы стратегического планирования достаточно активно изучались как в применении к производственной [9–10], так и к инвестиционной деятельности отдельных предприятий [11]. Их применение в математическом и программном обеспечении АСПВБ позволит использовать мощный аппарат технологии ДТ для более эффективного мониторинга опасных ситуаций на объектах ТЭК. Одной из основных его целей является планирование и проведение ЛПР комплексов мероприятий на отдельных участках объекта ТЭК.

Статья посвящена расчетам оценки влияния человеческого фактора на проведение комплексов мероприятий ПБ и обоснованным допущениям по их корректировке. Для этого в ней проводится анализ иерархий объекта ТЭК и определяются временные характеристики для комплексов мероприятий ПБ. Выводы ЛПР предоставляется делать на основе интегрального показателя качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ. Исходные данные для таких расчетов могут быть получены как из статистики, так путем моделирования в ДТ.

Методы

Основная задача ЛПР на объекте ТЭК в области ПБ — определение предпосылок к возникновению пожароопасных ситуаций. Для этого ему необходим соответствующий инструмент и инструментарий, который позволит этот инструмент доработать. Использование ДТ — новый этап применения ИТ.

Конкретный объект ТЭК всегда уникален. Поэтому внедрение инструментов, основанных на технологии ДТ, требует внимательного отношения и точной настройки. Последнюю выполняют специалисты конкретной версии данного инструмента при помощи встроенных ЯП. Ее проведение включает в себя не только детальное обследование объекта ТЭК, но также и правильного его отображения в виртуальной среде.

Стандартно поставляемые средства инструментов ДТ не решают специфических задач, связанных со многими аспектами общего обеспечения ПБ, а тем более с их конкретными особенностями в данном месте и в нужное время. Это ведет к необходимости создания помимо ПО и математических моделей, отражающих цели и задачи ЛПР в обеспечении ПБ конкретного объекта ТЭК.

Составной и наиболее значимой частью таких объектов служит его производственная составляющая. Она же представляет собой наиболее уязвимую с точки зрения ПБ область, мониторинг которой дает ЛПР наибольшее количество информации для оценки. Несмотря на то что производственная составляющая в структуре объектов ТЭК занимает подчиненное по отношению к менеджменту и инве-

¹ О стратегическом планировании в Российской Федерации : Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ (ред. от 17.02.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/91e10659398bccb0f67a7f04765cc758c682c684/

сторам компаний положение, основные угрозы ПБ возникают именно там.

Примером структурной схемы объекта ТЭК, с входящей в нее производственной составляющей в виде нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), может служить схема, представленная на рис. 1. Для других вариантов объектов ТЭК (предприятий транспортировки, газопереработки или нефтехимии) их общая структура будет незначительно отличаться от приводимой на рис. 1 схемы. Также следует заметить, что основные структурные отличия схем таких предприятий могут быть нивелированы. Поэтому, учитывая, что рассматриваемый в данной статье материал носит обобщающий характер, будем считать, что другие варианты структурных схем объектов ТЭК будут носить сходный или приводимый к данной (см. рис. 1) характер.

В целях определения основных задач и мероприятий ЛПР для мониторинга ПБ на объекте ТЭК с приводимой структурой рассматриваемая на рис. 1 иерархия должна быть уточнена. Производственную часть следует рассмотреть в виде подобной структурной схемы. Об этом говорит также и метод анализа иерархий [12]. Поэтому следующим шагом в таком анализе должна стать схема НПЗ, непосредственно подчиненного ЛПР в плане обеспечения ПБ. Несмотря на то что остальные элементы структурной схемы объекта ТЭК (см. рис. 1) также нуждаются в противопожарной защите, значительно большее число пожароопасных составляющих и порожда-

ющих опасные события элементов структуры находятся в производственной части объекта ТЭК.

Типовая производственная структура НПЗ с рядом выделенных на ней элементов приведена на рис. 2. Ее последующий перевод в цифровую форму будет аналогичен действиям по математическому моделированию процессов изготовления деталей на производстве [13].

Схема в общем и не раскрываемом виде показывает, какие объекты внутри НПЗ следует рассматривать ЛПР для обеспечения на них ПБ. Наиболее «информативным» с точки зрения возможных инцидентов ПБ и возникновения пожароопасных ситуаций на данной схеме является блок «Основное производство». Для НПЗ «различают три основных варианта переработки нефти: 1) топливный; 2) топливно-масляный; 3) нефтехимический (комплексный)»² (с. 151). Согласно принципиальной схеме НПЗ, работающего по топливному варианту, «головной установкой НПЗ является установка первичной переработки нефти (ЭЛОУ – АВТ)»³ (п. 4.2). Она соответствует блоку первичной обработки. Кроме нее в этом блоке указаны установки термического и каталитического крекингования, каталитических риформингов и гидроочистки, газопереработки, производство масел, а также серы и серной кислоты. На схеме (см. рис. 2) не указаны установки атмосферно-вакуумной перегонки, вторичной перегонки, изомеризации, гидродеалкилирования и депарафинизации⁴.

Для оценки итоговой нагрузки на ЛПР по обеспечению ПБ на НПЗ следует рассмотреть состав одного из выделенных в блоке «основное производство» цехов. Для примера можно рассмотреть схему расположения элементов технологического оборудования одного из вариантов ЭЛОУ – АВТ (ЭЛОУ – АВТ-6) на территории НПЗ⁴.

Сторона квадрата объекта на схеме равна примерно 210 м. Мелкие детали показывают основные агрегаты, работающие с пожароопасными сырьем и продуктами переработки. Другие цеха НПЗ, перечисленные выше и указанные на рис. 2, имеют не менее сложную структуру. Поэтому очевидно, что моделирование для них обеспечения ПБ в реальном времени не только требует применения аппарата и инструментов ДТ, но также и разработки



Рис. 1. Пример структурной схемы объекта ТЭК с НПЗ
Fig. 1. An example of a block diagram of a fuel and energy complex with an oil refinery

² Гуревич И.Л. Технология переработки нефти и газа : учебник для нефт. специальностей вузов. Ч. 1: Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа / под ред. канд. техн. наук А.Г. Сарданашвили и д-ра техн. наук А.И. Скобло. М. : Химия, 1972. 359 с.

³ Курс: Машины и аппараты нефтегазопереработки. Книга: Принципиальная схема НПЗ. URL: <https://moodle.kstu.ru/mod/book/tool/print/index.php?id=96507&ysclid=lmj3kujwuv318601801>

⁴ Псел М.С. Безопасность технологического процесса нагрева сырья на установке ЭЛОУ АВТ-6 в ОАО «Сызранский НПЗ». URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2834>

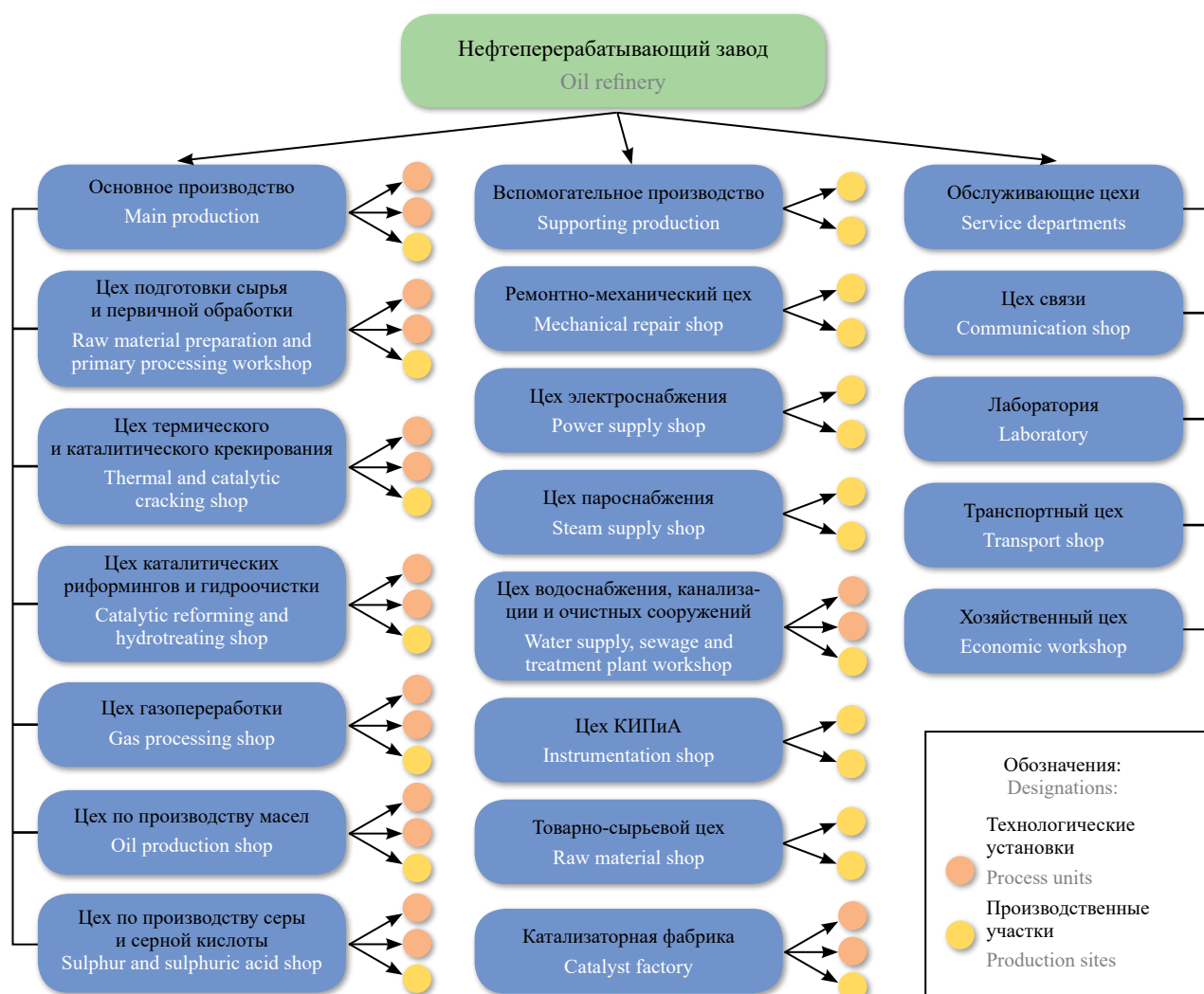


Рис. 2. Типовая производственная структура НПЗ⁵

Fig. 2. Typical production structure of an oil refinery⁵

дополнительных математических моделей, отсутствующих в инструментарии таких ИТ.

Дальнейшие уточнения иерархии приводить не будем, так как следующим этапом в анализе иерархий будут служить графы, относящиеся к отдельным агрегатам ЭЛОУ – АВТ. Схема данной установки имеет ряд участков. На каждом из них есть ряд больших пространственных элементов. Поэтому для отслеживания состояния среды возле и внутри них понадобятся дополнительные датчики так называемого первого уровня информирования АСУТП.

Выстраиваемая последовательность структурных схем наглядно продемонстрировала необходимость применения методов стратегического планирования для помощи ЛПР в оценке обстановки и состояния

агрегатов, среды и уровня обеспечения ПБ в различных местах объекта ТЭК. С точки зрения стратегического планирования ЛПР вынужден решать стратегическую задачу — проведение стратегического мониторинга на НПЗ для обеспечения ПБ с учетом анализа текущих показаний датчиков среды и состояния оборудования, а также допусков по показаниям этих датчиков. Кроме того, опытный ЛПР должен не только уметь оценить состояние (данные по метрологии) этих датчиков с учетом проводившихся на них мероприятий технического обслуживания (ТО) или ремонта в реальном времени, но также знать особенности моделирования работы различных производственных цехов [14, 15].

Для принятия решений о проведении мероприятий ПБ или по предупреждению опасных ситуаций ЛПР использует индикацию на средствах индивидуального или коллективного отображения. При этом его восприятие нужных показаний зависит от ряда факторов. В их числе ограниченность одновремен-

⁵ Типовая производственная структура нефтеперерабатывающего завода. URL: chema/47248-tipovaja-proizvodstvennaja-struktura-neftepererabatyvayuschego-zavoda.html?ysclid=lmkfer7kkm440199368

ного реагирования человеком на множественные события, усталость, возможное отсутствие ресурсов и т.п. Применение инструментария цифровых двойников и встроенных в них ЯП внутри подсистемы ПО АСПВБ при проведении ЛПР мониторинга ПБ объекта ТЭК с использованием методов стратегического планирования позволит ему моделировать различные ситуации при управлении, в том числе в реальном масштабе времени. Это даст ЛПР возможность трансформации своего «управленческого потенциала в конкурентные преимущества» [16].

Расчеты

Большинство цифровых двойников не используют встроенные математические модели, привязанные к конкретным условиям обстановки и предметной области. Производители ДТ выводят на рынок продукты с высокой степенью универсализации. Поэтому их необходимо настраивать на конкретные условия с помощью включаемых в их пакеты дополнительных математических моделей и специальных программ. Стратегический мониторинг, как составная часть методов стратегического планирования, требует своей проработки при включении его в математическое обеспечение АСПВБ при использовании в данной АС инструментария ДТ.

Данный разряд методов стратегического планирования используется ЛПР для определения им приоритетных мероприятий ПБ, актуальных в текущий момент времени и поддерживаемых имеющимися в его распоряжении ресурсами. Подсистемы АСПВБ с помощью датчиков информирования первого уровня помогают ему точно локализовать реализацию выбранных мероприятий. Применение ДТ относится к информационному, математическому и программному обеспечению указанной АС. Но основой для этого служат математические модели.

Аппарат стратегического планирования предполагает использование в качестве цели агрегатного показателя. В данном случае назовем его показателем качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ. На рис. 3 показаны выполняемые на объекте ТЭК мероприятия по обеспечению ПБ на разном количестве уровней, что вполне соответствует приводимым выше рассуждениям. Также продемонстрировано, что агрегатный показатель качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ (АПКМПБ) может рассчитываться как для отдельного участка, так и для всего объекта ТЭК.

Если рассматривать составную часть объекта ТЭК (например, ЭЛОУ – АВТ), то каждая из них содержит разное число отдельных, требующих обеспечения ПБ, элементов. Для каждого из них требу-

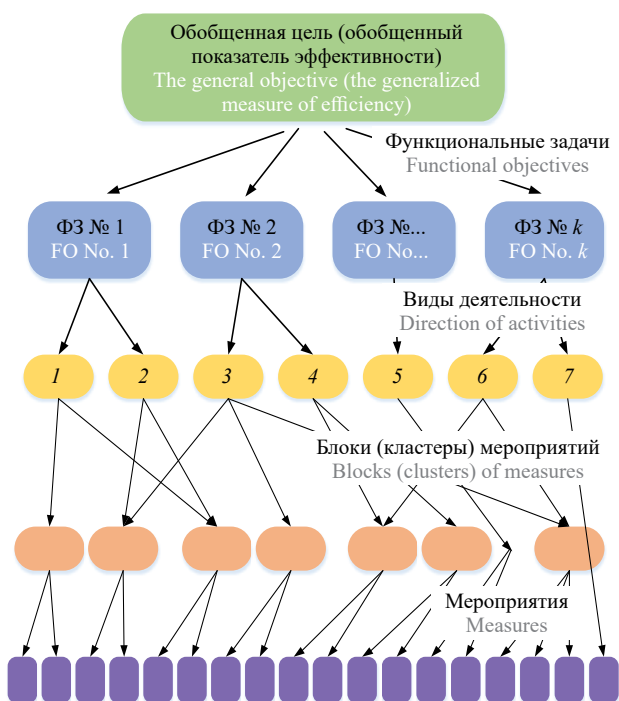


Рис. 3. Выполняемые объектом ТЭК мероприятия ПБ с разным количеством уровней [17]

Fig. 3. Fire safety measures carried out by fuel and energy complex facility with a different number of levels [17]

ется свой комплекс мероприятий по обеспечению ПБ, что вполне соответствует дереву с рис. 3. Каждому элементу ЭЛОУ – АВТ требуется свой АПКМПБ. При этом АПКМПБ всей установки будет использовать исходные данные всех ее агрегатов.

Перейдем к расчетной части. По аналогии с расчетами, приведенными в источнике [18], АПКМПБ следует рассматривать как «интегральную степень завершенности всего комплекса мероприятий». Для выбранных условий применения с учетом того, что на территории объекта ТЭК может находиться несколько участков стратегического мониторинга ПБ (объектов защиты), для каждого из них можно рассчитать АПКМБ Ω_i , который можно записать так:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{мер},i}} \xi_{ji} \cdot \beta_{ji}, \quad (1)$$

где Ω_i — АПКМПБ i -го участка объекта ТЭК;

$N_{\text{мер},i}$ — число мероприятий по обеспечению ПБ i -го участка объекта ТЭК;

ξ_{ji} — текущая степень выполнения j -го мероприятия ПБ для i -го участка объекта ТЭК;

β_{ji} — параметр агрегатного показателя качества деятельности по обеспечению ресурсами j -го мероприятия ПБ в рассматриваемом периоде времени.

Если на объекте защиты ЛПР осуществляет мониторинг $N_{\text{уч}}$ участков, то общее число мероприятий по обеспечению ПБ $N_{\text{мер.ОЗ}}$:

$$N_{\text{мер.ОЗ}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{уч}}} N_{\text{мер.к}}. \quad (2)$$

Соответственно, АПКМПБ для группы участков $\Omega_{\text{гр}}$:

$$\Omega_{\text{гр}} = \sum_{l=1}^{N_{\text{мер.ОЗ}}} \Omega_l. \quad (3)$$

Степень выполнения j -го мероприятия ПБ для i -го участка объекта ТЭК может рассчитываться по-разному. В одних случаях — это величина случайная и нормированная. В других — детерминированная и существует в заданных рамках и единицах измерения.

Как правило, она определяется по результатам мониторинга. При расчете степени завершенности мероприятий или их комплексов следует учитывать величину, которую можно назвать долей «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на i -м участке γ_i ($\gamma_i < 1$). Ее введение объясняется тем, что при необходимости одновременного контроля выполнения комплексов мероприятий ПБ сразу на нескольких участках $N_{\text{к.уч}}$ ($N_{\text{к.уч}} < N_{\text{уч}}$) доля «внимательности» ЛПР снижается. Условно можно считать, что при $N_{\text{к.уч}} = 2$ — это снижение вдвое, при $N_{\text{к.уч}} = 3$ — втрое и т.д. Поэтому для каждого из одновременно контролируемых участков ЛПР выделяет для принятия решений и контроля только часть того времени, которое он выделил бы для этого при работе только с одним участком.

Резонно предположить, что при равномерном распределении внимания ЛПР доля «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на i -м участке γ_i следует рассчитывать так:

$$\gamma_i = \frac{1}{N_{\text{к.уч}}}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N_{\text{к.уч}}\}. \quad (4)$$

При неравномерном распределении внимания ЛПР следует ввести ряд коэффициентов по приоритетам $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_{\text{уч}}}\}$, где

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{к.уч}}} \alpha_i = 1. \quad (5)$$

При этом не обязательно, что

$$\alpha_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{\text{к.уч}}} \alpha_i}.$$

Тогда доля «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на i -м участке с учетом приоритета:

$$\gamma_i = \alpha_i \left(\frac{1}{N_{\text{к.уч}}} \right). \quad (6)$$

Аналогичным образом следует рассматривать и отдельные мероприятия в их комплексе для i -го участка объекта ТЭК. Выполнение каждого из них в последовательности мероприятий комплекса будет обусловлено своей долей «внимательности» ЛПР. Применение коэффициентов γ_{ji} при выполнении j -го мероприятия ПБ для i -го участка объекта ТЭК точнее покажет затруднения в достижении нужных значений АПКМПБ.

Ввиду большой вариативности единиц измерения, применяемых для оценки качества мероприятий, для количественной оценки текущей степени выполнения j -го мероприятия ПБ для i -го участка объекта ТЭК воспользуемся временем проведения каждого из них. Известно, что опасные ситуации развиваются достаточно быстро, и каждый из комплексов мероприятий следует «уложить» в необходимые временные рамки. Примем за максимально допустимое время развития опасной ситуации независимо от этапа ее развития, в течение которого ЛПР должен ее проанализировать, подготовить и запустить комплекс мероприятий по обеспечению ПБ за $t_{\text{ОПС кр}}$. Тогда временной вариант оценки интегральной степени завершенности комплекса мероприятий для i -го участка объекта ТЭК (соответствие АПКМПБ требованиям ПБ):

$$t(\Omega_i) \leq t_{\text{ОПС кр}}, \quad (7)$$

где $t(\Omega_i)$ — регламентированное время комплекса мероприятий для i -го участка объекта ТЭК.

Регламентированное время выполнения комплекса мероприятий для каждого из участков определяется в соответствии с планом мероприятий по обеспечению ПБ и особенностями выполнения каждого мероприятия в текущей обстановке. Если количество мероприятий для каждого участка $N_{\text{мер.и}}$ то

$$t(\Omega_i) = \sum_{j=1}^{N_{\text{мер.и}}} t_{ji}, \quad (8)$$

где t_{ji} — регламентированное время выполнения j -го мероприятия ПБ для i -го участка объекта ТЭК.

Соответственно, при одновременном контроле ЛПР выполнения комплексов мероприятий ПБ сразу на нескольких участках $N_{\text{к.уч}}$ АПКМПБ как регламентированное время их выполнения следует рассчитывать:

$$t(\Omega_{\text{агр}})_{\text{пер}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{к.уч}}} t(\Omega_k). \quad (9)$$

Реальное же время выполнения j -го мероприятия ПБ и комплекса мероприятий для i -го участка объекта ТЭК при одновременном контроле ЛПП нескольких комплексов мероприятий ПБ на участках $N_{к.уч}$ увеличится с учетом рассчитанного выше коэффициента (см. (6)):

$$t(\Omega_{agr})_{реал} = \sum_{k=1}^{N_{к.уч}} \frac{t(\Omega_k)}{\gamma_k}. \quad (10)$$

Соответственно:

$$\sum_{k=1}^{N_{к.уч}} \frac{t(\Omega_k)}{\gamma_k} \leq t_{ОПС\ кр}. \quad (11)$$

Формула (11) представляет собой временную модель АПКМПБ с учетом влияния человеческого фактора при выполнении ЛПП мониторинга объекта ТЭК для контролируемых ЛПП $N_{к.уч}$ участков объекта ТЭК, на которые распространяются последствия возникшей опасной с точки зрения ПБ ситуации. Общее для $N_{к.уч}$ время $t_{ОПС\ кр}$ показывает, что возникшая опасная ситуация одна для нескольких участков. При возникновении нескольких опасных с точки зрения ПБ ситуаций на объекте ТЭК формулу (11) следует заменить системой неравенств, в левой части которой будет временная характеристика действий ЛПП по мониторингу и реагированию на них. А в правой части — ограничения по времени, показывающие допуск по времени при их развитии. При этом в общем случае число развивающихся опасных ситуаций $N_{ОПС}$ не совпадает с числом участков объекта ТЭК $N_{к.уч}$, на которые будет распространяться их воздействие. Вероятнее всего $N_{к.уч} \leq N_{ОПС}$.

Результаты

Регламентированное время выполнения комплексов мероприятий ПБ i -го участка объекта ТЭК $t(\Omega_i)$ должно выбираться исходя из статистики наблюдений за проявлениями признаков пожароопасных ситуаций в течение нескольких лет. Оно должно корректироваться на случай возникновения ситуации, развитие которой будет происходить за потенциально меньшее время, чем то, которое даст статистический анализ. Аналогичным образом следует определять и реальное время выполнения мероприятий в комплексе (на основе статистических данных реально измеренных времен за несколько лет).

Корректировка расчета временных характеристик комплекса мероприятий ПБ выполняется

путем уменьшения указанного времени на разность между среднестатистическими регламентированным и реально требуемым временами. Статистические данные могут быть получены не только на основе реальных наблюдений, но и с применением возможностей ДТ. Использование временной модели АПКМПБ с учетом влияния человеческого фактора при выполнении ЛПП мониторинга объекта в текущих условиях обстановки — дополнительный мощный инструмент контроля ПБ на различных участках объекта ТЭК. Зная ограничения по времени, он может оперативно внести изменения в план или изменить комплекс мероприятий так, чтобы развитие предпожарной ситуации не привело к катастрофическим последствиям или ее влияние на объект было максимально сокращено.

Выводы

Оценка степени завершенности комплекса мероприятий ПБ на каждом отдельном участке объекта ТЭК является важной характеристикой, позволяющей ЛПП совершать более обоснованные управленческие действия. Цифровые двойники помогают ему делать это с использованием виртуального моделирования обстановки, являясь новой платформой информационных технологий, потенциально используемой в АСПББ для стратегического мониторинга объектов ТЭК. Вместе с тем доступные в настоящее время программные системы ДТ, используемые для практической реализации эксплуатационных моделей предприятий (SMART Factory), а также другие их виды («цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA)») [19] не содержат математических моделей, учитывающих особенности действий ЛПП при мониторинге опасных ситуаций, связанных с обеспечением ПБ на объектах ТЭК.

Таким образом, их включение в аппарат подсистем программного, информационного и математического обеспечения АСПББ позволит точнее определять интегральную степень завершенности комплексов мероприятий по обеспечению ПБ на различных участках объектов ТЭК, а использование ПО на основе ДТ поможет сделать принятие решений ЛПП более обоснованным. Это позволит улучшить системы поддержки принятия решений при предотвращении и при тушении пожаров, в том числе описанные в [20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В.* Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 244 с.
2. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю., Кйеу Туан Ань.* Модель оценки влияния мероприятий пожарной безопасности на агрегатную цель для цифровых двойников объектов ТЭК // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2019. Т. 28. № 3. С. 50–58. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58
3. *Габидуллин И.Р., Федоров С.Н.* Применение цифровых двойников в нефтегазовой отрасли // Актуальные исследования. 2023. № 25 (155). Ч. I. С. 56–60.
4. *Grieves M., Vickers J.* Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Kahlen F.J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). Springer, 2017. Pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
5. *Menshenin Y., Moreno C., Brovar Y., Fortin C.* Integration of MBSE and PLM: complexity and uncertainty, International // Journal of Product Lifecycle Management. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 66–88. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.10037270
6. *Vieira D., Schmoller E., Bravo A., Chang Chain M.* Functionality roadmap to define a configuration scope for implementing a PLM system // International Journal of Product Lifecycle Management. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 224–243. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.118038
7. *Батура А.Н., Ничепорчук В.В., Бутузов С.Ю.* Применение цифровых двойников для оценки и управления рисками // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 4. С. 109–120. URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23_109-120.pdf. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.85.25.014
8. *Смирнова О.О., Беляевская-Плотник Л.А., Бочарова Л.К.* Методологические подходы к реализации принципов формирования системы стратегического планирования в РФ // Инновации. 2020. № 2 (256). С. 37–42. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.256.2.005
9. *Ибрагимова Р.С., Головкин Д.С.* Методическое обоснование оценки экономического потенциала предприятия // Современные наукоемкие технологии // Региональное приложение. 2016. Т. 3. № 47. С. 64–74.
10. *Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu., Pustovoyt K.S.* Improving the quality of the industrial enterprise management based on the network-centric approach // R-Economy. 2015. Vol. 4. Pp. 608–617. DOI: 10.15826/recon.2015.4.023
11. *Лобова Е.С., Мамаева Л.Н., Сафарова Н.А.К.* Особенности стратегического планирования на предприятиях нефтегазового комплекса // Вестник СГЭСУ. 2020. № 1(80). С. 53–56.
12. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.
13. *Bogodukhova E., Britvina V., Pitelinskiy K., Gavrilyuk A., Nurgazina G.* Digital process simulation twins using statistics and information technologies // E3S Web of Conferences. 2023. No. 431. P. 05033. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105033
14. *Kohnehsahri R.K., Salimi M., Seyed Reza Seif Mohaddecy Saeed Shirazian.* Modeling and numerical simulation of catalytic reforming reactors // Oriental Journal of Chemistry. 2011. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1351–1355.
15. *Wanasinghe Th.R., Wroblewski L., Petersen B.K., Gosine R.G., James L.A., Silva O.D. et al.* Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges // IEEE Access. 2020. Vol. 99. Pp. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
16. *Азиева Р.Х., Таймасханов Х.Э., Ахмадов М.И., Хлебников К.В.* Современное состояние процессов планирования и прогнозирования на предприятиях нефтегазового комплекса // Вестник БГУ. Экономика и менеджмент. 2023. № 2. С. 3–13. DOI: 10.18101/2304-4446-2023-2-3-13
17. *Самарин И.В., Фомин А.Н.* Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для стратегического мониторинга деятельности // Статистика и экономика. 2014. № 5. С. 84–89.
18. *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 РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. 2018. № 4 (293). С. 143–154.
19. *Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун.* Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 12 (73). С. 66–73. DOI: 10.30987/article_5c0f808e9b29f7.40393956
20. *Тетерин И.М., Топольский Н.Г., Прус Ю.В., Климовцов В.М.* Системы поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров / под общ. ред. Н.Г. Топольского. М. : Академия ГПС МЧС России, 2008. 102 с.

REFERENCES

1. Abrosimov A.A., Topolsky N.G., Fedorov A.V. *Automated systems of fire and explosion safety of oil refineries*. Moscow, MIPB of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1999; 244 (rus).
2. Topolsky N.G., Samarin I.V., Stroganov A.Yu., Keu Tuan An. A model for assessing the impact of fire safety measures on the aggregate target for digital counterparts of fuel and energy facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2019; 28(3):50-58. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58 (rus).
3. Gabidullin I.R., Fedorov S.N. The use of digital doubles in the oil and gas industry. *Actual research*. 2023; 25(155):56-60. (rus).
4. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Kahlen F.J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). Springer. August 2017; 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
5. Menshenin Y., Moreno C., Brovar Y., Fortin C. Integration of MBSE and PLM: complexity and uncertainty. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2021; 13(1):66-88. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.10037270
6. Vieira D., Schmoller E., Bravo A., Chang Chain M. Functionality roadmap to define a configuration scope for implementing a PLM system. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2021; 13(3):224-243. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.118038
7. Baturo A.N., Nicheporchuk V.V., Butuzov S.Yu. The use of digital doubles for risk assessment and management. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2021; 4:109-120. URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23_109-120.pdf. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.85.25.014 (rus).
8. Smirnova O.O., Belyaevskaya-Plotnik L.A., Bocharova L.K. Methodological approaches to the implementation of the principles of formation of the strategic planning system in the Russian Federation. *Innovations*. 2020; 2(256): 37-42. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.256.2.005 (rus).
9. Ibragimova R., Golovkin D. Methodological substantiation of the estimation of economic potential of the enterprise. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2016; 3(47):64-74. (rus).
10. Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu., Pustovoyt K.S. Improving the quality of the industrial enterprise management based on the network-centric approach. *R-Economy*. 2015; 608-617. DOI: 10.15826/recon.2015.4.023
11. Lobova E.S., Mamaeva L.N., Safarova N.A.K. Features of strategic planning at oil and gas complex enterprises. *Bulletin of the SSEU*. 2020; 1(80):53-56. (rus).
12. Saati T. *Decision-making. Method of hierarchy analysis*. Translated from the English by R.G. Vachnadze. Moscow, Radio and Communications Publ., 1993; 278.
13. Bogodukhova E., Britvina V., Pitelinskiy K., Gavriluk A., Nurgazina G. Digital process simulation twins using statistics and information technologies. *E3S Web of Conferences*. 2023; 431:05033. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105033
14. Kohnehshahri R.K., Salimi M., Seyed Reza Seif Mohaddecy Saeed Shirazian. Modeling and numerical simulation of catalytic reforming reactors. *Oriental Journal of Chemistry*. 2011; 27(4):1351-1355.
15. Wanasinghe Th.R., Wroblewski L., Petersen B.K., Gosine R.G., James L.A., Silva O.D. et al. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*. June, 2020; 99:1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
16. Azieva R.H., Taimaskhanov H.E., Akhmadov M.I., Khlebnikov K.V. The current state of planning and forecasting processes at oil and gas complex enterprises. *Bulletin of BSU. Economics and Management*. 2023; 2:3-13. DOI: 10.18101/2304-4446-2023-2-3-13 (rus).
17. Samarin I.V., Fomin A.N. Strategic planning at the enterprise: application of the hierarchy analysis method for strategic monitoring of activities. *Statistics and Economics*. 2014; 5:84-89. (rus).
18. Samarin I.V., Stroganov A.Yu. A model for assessing fire safety at fuel and energy complex facilities using their time characteristics on strategic planning graphs in the automated management support system. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NIU)*. 2018; 4(293):143-154. (rus).
19. Frolov E.B., Klimov A.S., Zin Min Khtun. Digital twin of a production system based on the MES category software. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2018; 12(73):66-73. DOI: 10.30987/article_5c0f808e9b29f7.40393956 (rus).
20. Teterin I.M., Topolsky N.G., Prus Yu.V., Klimovtsov V.M. Under the general editorship of N.G. Topolsky. *Management decision support systems for fire extinguishing*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2008; 102.

Поступила 23.10.2023, после доработки 06.11.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received October 23, 2023; Received in revised form November 6, 2023;

Accepted November 15, 2023

Информация об авторах

САМАРИН Илья Вадимович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; Scopus AuthorID: 24725751900; РИНЦ ID: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

КУХАРСКИЙ Владислав Валерьевич, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 1155514; ORCID: 0009-0006-5780-6488; e-mail: kvv@gubkin.pro

Вклад авторов:

Самарин И.В. — научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Кухарский В.В. — концепция исследования; проведение экспериментов и расчетов; написание исходного текста. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Ilya V. SAMARIN, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; Scopus AuthorID: 24725751900; ID RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311, e-mail: ivs@gubkin.ru

Vladislav V. KUKHARSKIY, Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 1155514; ORCID: 0009-0006-5780-6488; e-mail: kvv@gubkin.pro

Contribution of the authors:

Samarin I.V. — scientific guidance; revision of the text; final conclusions.

Kukharskiy V.V. — the concept of the study; conducting experiments and calculations; writing the source text. The authors declare no conflicts of interests.

Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий

Алла Александровна Гусарова ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является теоретическое исследование в виде обзора и анализа текущих ограничений и возможностей применения современных информационных технологий в сфере строительной отрасли для повышения уровня пожарной безопасности объектов капитального строительства.

Задачи исследования:

- обзор и анализ зарубежных и отечественных исследований в области применения современных информационных технологий в сфере строительства и пожарной инженерии;
- выявление текущих проблем и возможностей применения рассматриваемых информационных технологий для задач пожарной безопасности;
- описание возможного алгоритма реализации сценария применения BIM для целей оценки проектных решений на предмет пожарной безопасности.

Актуальность настоящей темы обусловлена малым опытом применения рассматриваемых в статье развивающихся информационных технологий в строительной отрасли в России для решения задач пожарной инженерии.

Состояние цифровизации сегодня. Выполнен обзор исследования американской организации «Общество инженеров пожарной защиты», в котором рассмотрены проблемы и перспективы развития сферы пожарной безопасности с учетом текущей всеобщей цифровизации. Описаны современные технологии, применяемые в сфере строительства и эксплуатации, которые могут быть использованы для решения задач пожарной безопасности. Приведены варианты применения технологии информационного моделирования здания, «цифрового двойника» объекта капитального строительства и Интернета вещей для решения задач пожарной безопасности.

Выводы. Результаты исследования позволили определить текущие проблемы и перспективы применения современных информационных технологий для повышения безопасности объектов капитального строительства. Выделенная проблематика может быть использована для развития теоретических и практических исследований по рассмотренной тематике.

Ключевые слова: информационное моделирование здания; цифровой двойник; искусственный интеллект; Интернет вещей; трехмерная модель

Для цитирования: Гусарова А.А. Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 36–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.36-46.

✉ Гусарова Алла Александровна, e-mail: 2609gaa@gmail.com

Modern information technologies as a tool to improve fire safety of buildings

Alla A. Gusarova ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is a theoretical study in the form of review and analysis of current limitations and possibilities of application of modern information technologies in the sphere of construction industry to increase the level of fire safety of capital construction objects.

Objectives of the study:

- review and analysis of foreign and domestic research in the field of application of modern information technologies in the field of construction and fire engineering;
- identification of current issues and possibilities of application the information technologies under consideration for fire safety tasks;

- description of a possible algorithm of realization of the scenario of BIM application for the purposes of assessment of design solutions for fire safety.

The relevance of the topic under consideration is due to the limited experience of application of the developing information technologies considered in the article in the construction industry in Russia to solve fire engineering problems.

Current state of digitalization. The review of the study of the American organization "Society of Fire Protection Engineers", which examined the issues and prospects of development of the sphere of fire safety, taking into account the current universal digitalization, is carried out. Modern technologies used in the field of construction and operation, which can be used to solve fire safety problems, are described. The variants of application of building information modelling technology, a "digital twin" of the capital construction object and the Internet of Things to solve fire safety problems are presented.

Conclusions. The results of the study made it possible to identify the current issues and prospects of application of modern information technologies to improve the safety of capital construction objects. The identified issues can be used to develop theoretical and practical research on the considered subject.

Keywords: building information modelling; digital twin; artificial intelligence; Internet of Things; three-dimensional model

For citation: Gusarova A.A. Modern information technologies as a tool to improve fire safety of buildings. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):36-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.36-46 (rus).

✉ Alla Aleksandrovna Gusarova, e-mail: 2609gaa@gmail.com

Введение

Развитие современных технологий обеспечивает цифровизацию строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства. В данной статье рассматривается возможность применения технологий информационного моделирования, «цифрового двойника» объекта капитального строительства, Интернета вещей (англ. internet of things, IoT) и искусственного интеллекта для задач пожарной инженерии. В результате цифровизации строительной отрасли появляется большой объем данных об объекте капитального строительства на разных этапах его жизненного цикла. Эти данные могут быть использованы в процессе принятия решений различных задач, связанных с управлением проектом.

Цель статьи состоит в определении текущих возможностей и проблем при применении рассматриваемых современных отраслевых информационных технологий для решения задач пожарной безопасности. Для достижения поставленной цели был проведен обзор и анализ текущих исследований и практик применения рассматриваемых технологий в области пожарной инженерии.

Исследование является важным в связи с тем, что рассматриваемые информационные технологии позволяют получать большой объем актуальных данных об объекте строительства, применение которых может повысить качество принятия решений в процессе управления объектом. Однако существует потребность в определении необходимого объема таких данных, способах и вариантах их использования. Важно понять, качество решения каких задач может быть улучшено за счет получения более актуальной, достоверной и полной информации об объекте.

Также на данный момент не существует общепринятого подхода по согласованному применению

рассматриваемых информационных технологий для задач, возникающих в процессе управления проектом, в том числе для задач обеспечения безопасности объекта. Это связано с тем, что:

- рассматриваемые информационные технологии на данный момент развиваются и имеют небольшое практическое применение;
- множество участников, задействованных на разных этапах жизненного цикла объекта, часто ведут свою деятельность в специализированных системах, которые не имеют прямой интеграции с системами других участников проекта, что влияет на качество взаимодействия и обмена информацией внутри проекта. Это может касаться в том числе и смежных специалистов.

Состояние цифровизации сегодня

В 2022 г. рабочая группа по цифровизации, искусственному интеллекту и кибербезопасности (DAIC) американского фонда Общества инженеров пожарной защиты (SFPE) провела исследование [1], связанное с развитием цифровизации в строительстве, в ходе которого выбраны основные актуальные темы для изучения:

- управление данными о пожаре;
- умное моделирование пожара;
- цифровое проектирование, проверка, эксплуатация и техническое обслуживание систем противопожарной безопасности;
- цифровое пожаротушение и эвакуация.

Исследование рассматривало и этические вопросы, которые затрагивают каждую из перечисленных тем. На рис. 1 продемонстрирована взаимосвязь рассматриваемых тем.

Управление пожарными данными связано с тем, что эти данные можно архивировать и управлять ими до и после возникновения пожара с целью

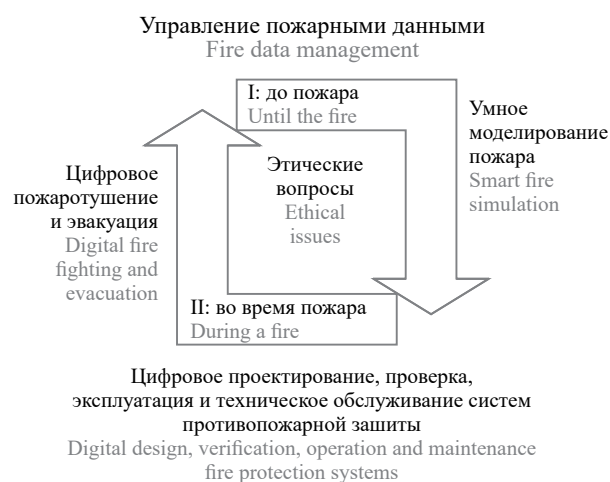


Рис. 1. Актуальные темы исследования
Fig. 1. Current research topics

выбора наиболее правильных решений на всех этапах жизненного цикла здания для предотвращения пожаров и получения отчетов о происшествиях. На основе указанных данных может быть реализовано моделирование процессов и обучение систем искусственного интеллекта (ИИ). Развитие цифровых технологий, IoT и «цифровых двойников» позволит выполнять раннее прогнозирование разных сценариев пожаров и принимать правильные

решения в борьбе с пожарами и для спасения людей. Этические вопросы, объединяющие все перечисленные аспекты исследований, связаны с профессиональным развитием специалистов, безопасностью личных данных, получаемых с IoT-устройств, и формированием требований к развитию искусственного интеллекта.

Основные проблемы, выявленные по итогам исследования [1], представлены в таблице.

В России в процессы строительной отрасли активно внедряются технологии информационного моделирования (ТИМ). Информационное моделирование позволяет получать цифровую информацию о модели объекта строительства (ЦИМ, английский аналог — BIM). ЦИМ представляет собой трехмерную модель объекта, состоящую из отдельных взаимосвязанных компонентов и содержащую информацию о характеристиках компонентов объекта в виде атрибутивного состава. ЦИМ здания развивается в соответствии с жизненным циклом самого здания: проектно-изыскательские работы — строительство — эксплуатация — снос. В процессе развития проекта модель наполняется актуальными данными, которые могут использоваться для автоматического анализа для различных целей.

Актуальные проблемы
Current issues

Проблема Issue	Описание Specification
Отсутствие эффективной системы оценки моделей пожара на основе ИИ Lack of an effective system for assessing fire models based on AI	Отсутствие системы, показателей оценки и признанных, надежных общепринятых стандартных наборов данных для обучения ИИ и моделирования сценариев пожара является на данный момент препятствием для развития в этой области. В работе [2] рассматривается пример системы индексов оценки здания по уровню потенциального риска, допустимому уровню риска и уровню защищенности The lack of systems, evaluation metrics and recognized, reliable, generally accepted standard datasets for AI training and fire scenario modelling is currently an obstacle to development in this area. In [2], an example of a system of indices for assessing a building according to the level of potential risk, acceptable level of risk and protection level is discussed
Недостаточное исследование применения информационного моделирования зданий (BIM) в сфере пожарной безопасности Insufficient research on the application of building information modelling (BIM) in the fire safety sector	Проблемы применения BIM, которые требуют изучения, связаны с разработкой системы противопожарной защиты на основе BIM и цифровых двойников, получением данных из BIM для моделирования и анализа пожара, конфиденциальностью и безопасностью данных при передаче моделей BIM третьим лицам. Таким образом, отсутствует систематическое понимание применения BIM для моделирования сценариев пожара The BIM application issues that need to be studied are related to the development of BIM-based fire protection system and digital twins, the acquisition of data from BIM for fire modelling and analysis, data privacy and security when BIM models are shared with third parties. Thus, there is a lack of systematic understanding of the application of BIM for modelling fire scenarios
Цифровая безопасность Digital security	Цифровые системы имеют потенциальные уязвимости безопасности, которые могут быть использованы злоумышленниками. Разработка систем пожарной безопасности должна учитывать требования кибербезопасности. Для этого специалисты и инженеры должны иметь соответствующие знания Digital systems have potential security vulnerabilities that can be exploited by attackers. The development of fire safety systems must take cyber security requirements into account. For this purpose, specialists and engineers must have the appropriate knowledge

Проблема Issue	Описание Specification
Высокие затраты на применение новых информационных технологий High costs for the application of new information technologies	Высокие затраты на установку и обслуживание цифровых систем являются ограничивающим фактором для широко применения этих дорогостоящих систем The high cost of installing and maintaining digital systems is a limiting factor for widespread use of these expensive systems
Проблемы, связанные с управлением базами данных в сфере пожарной безопасности Issues related to database management in the sphere of fire safety	Характерными проблемами для управления базами данных могут быть такие как: отсутствие стандартного формата для обмена данными экспериментов, моделирования или реальных пожаров. Это препятствует созданию общей большой базы данных о пожарах Typical issues for database management may include: the lack of a standard format for exchanging data from experiments, modelling or real fires. This prevents the creation of a common large fire database
Недоверие к применению ИИ Distrust in the use of AI	Внедрение интеллектуального моделирования пожаров может вызывать недоверие академического сообщества к результатам использования искусственного интеллекта. Это недоверие может быть связано с природой черного ящика или интерпретируемостью моделей ИИ. Такая проблема затронута в работе [3] The implementation of intelligent fire modelling may cause mistrust in the academic community in the results of artificial intelligence. This mistrust may be related to the black box nature or the interpretability of AI models. This issue is raised in the work [3]
Проблема междисциплинарной интеграции Issue of interdisciplinary integration	Цифровизация в областях проектирования, проверки, эксплуатации и технического обслуживания объектов предполагает междисциплинарное сотрудничество и совместимость на нескольких платформах. На данный момент выделены разные технологии (IoT, BIM) и системы (противопожарной защиты, управления зданием), которые имеют собственные программные инструменты. Отсутствие общей платформы, позволяющей обеспечивать передачу данных между разными дисциплинами, является барьером в развитии рассматриваемой области. Такая проблема затронута в работе [4], где рассматривается применение общеобменного формата IFC Digitalization in the areas of design, inspection, operation and maintenance of facilities involves interdisciplinary cooperation and interoperability on several platforms. At the moment, different technologies (IoT, BIM) and systems (fire protection, building management) are identified, which have their own software tools. The lack of a common platform that allows data transfer between different disciplines is a barrier to the development of the area under consideration. This issue is raised in [4], where the application of the general exchange format IFC is considered
Отсутствие понимания эффективности и целей цифровых систем пожаротушения Lack of understanding of the effectiveness and purpose of digital fire suppression systems	Отсутствие достаточного опыта применения цифровых систем пожаротушения приводит к непониманию эффективности, стоимости и потенциальных экономических выгод таких систем, что является барьером для привлечения инвестиций. Также на данный момент нет четкой и конкретной цели применения цифровых систем пожаротушения и эвакуации, что замедляет их развитие, так как цель определяет путь развития The lack of sufficient experience in the application of digital fire extinguishing systems leads to a lack of understanding of the effectiveness, cost and potential economic benefits of such systems, which is a barrier to attracting investment. Also, at the moment, there is no clear and specific goal for the application of digital fire extinguishing and evacuation systems, which slows down their development, as the goal determines the path of development

На сегодняшний момент существуют разные направления исследования в части использования данных ЦИМ зданий, например, в части пожарной безопасности можно выделить следующие направления (рис. 2):

- оценка пожарной безопасности на площадке строительства;

- моделирование пожара;
- моделирование эвакуации;
- оценка пожарной безопасности объекта строительства на соответствие требований пожарной безопасности;
- оценка пожарных рисков на объекте строительства;

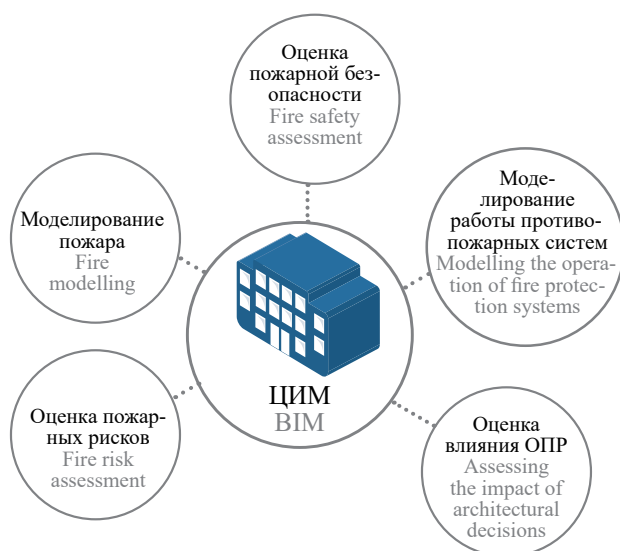


Рис. 2. ЦИМ для решения задач в области пожарной безопасности

Fig. 2. BIM for solving fire safety issues

- анализ распространения продуктов горения;
- оценка влияния объемно-планировочных решений (ОПР) на пожарную безопасность объекта;
- моделирование режимов работы систем вентиляции противопожарного назначения;
- моделирование систем автоматической противопожарной сигнализации и систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре и др.

Системы обнаружения пожара все больше интегрируются с системами автоматизации и управления зданиями для обеспечения полноценной защиты здания от различных чрезвычайных ситуаций. Применение взаимосвязанных IoT-устройств позволяет настроить более гибкие алгоритмы для срабатывания систем защиты объекта и снизить вероятность ложного срабатывания. Данные, полученные с помощью IoT, могут быть полезны для служб экстренного реагирования. Например, информация о местонахождении людей и местах пожара может быть актуальна для пожарных подразделений в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Также могут отслеживаться данные о соблюдении требований пожарной безопасности на объекте с целью контроля состояния здания.

Исследование задачи определения фактического местоположения людей на объекте. В работе [5] рассматривается метод определения численности и местоположения посетителей здания при их эвакуации из здания по Wi-Fi, который позволяет отслеживать мобильные устройства. В работе представлена математическая модель и алгоритм рассматриваемого метода, а также программный инструмент, позволяющий его реализовать.

Для определения локации мобильного устройства в зданиях коридорного типа была приме-

нена модель для вычисления потерь радиосигнала ITU-R P.1238.8. В работе [5] представлена потоковая модель и алгоритм для перемещения динамических потоков с учетом свойств модели. Разработанная программа в исследовании позволяет сканировать Wi-Fi сетей, моделировать процесс эвакуации и вычислять местоположение мобильного телефона.

В публикации [6] рассматривается система пожарной эвакуации на основе информационного моделирования зданий (BIM) и дополненной реальности (AR), которая может обеспечить доступ в режиме реального времени к такой информации, как текущее местоположение пользователя, выход, расстояние кратчайшего маршрута от текущего местоположения до пункта назначения, а также виртуальная зеленая линия, голос и направление стрелки для руководства по эвакуации. В результате исследования для проверки были произведены дополнительные замеры расстояний от маркеров до выходов лазерным дальномером. По результатам проверки процентная разница по указанным расстояниям, рассчитанным разработанной системой и лазерным дальномером, составляет менее 2,2 %. Следовательно, система эффективно предоставляет требуемую информацию. Однако у разработанной системы есть текущие ограничения, связанные с тем, что пользователю нужно отсканировать изображение с маркером, размещенное на стенах, чтобы получить информацию в реальном времени. В будущем в систему планируется добавить больше информации с датчиком, чтобы алгоритм мог советовать безопасный вариант эвакуации.

Исследование задачи получения актуальных данных об объекте для управления процессами на объекте. В работах [7, 8] рассматриваются примеры и преимущества применения BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла объекта для обеспечения его безопасности за счет повышения качества проектной, строительной документации, исполнительной и эксплуатационной документации проекта по архитектурным и конструктивным решениям и по системам противопожарной защиты. В том числе рассматриваются варианты интеграции BIM с системами управления объектом для визуализации актуальных данных об объекте, мониторинга и расчета воздействий на объект.

Каждый элемент трехмерной ЦИМ содержит информацию о себе в виде атрибутов и их значений. Например, коридор замоделирован элементом «Помещение» или «Пространство», который содержит атрибуты «Наименование» со значением «Коридор», «Высота» со значением «2 м» и так далее. В процессе проверки модели можно автоматизированно проверять информацию атрибутов во всех элементах модели по заданным правилам.

Таким образом можно проверить все элементы модели архитектуры на соответствие требованиям пожарной безопасности. Например, можно выбрать все элементы с именем «Коридор» и проверить в них атрибут «Ширина» по условию, что значение $< 1,8$ м».

В докладе [9] автором ранее были рассмотрены примеры применения искусственного интеллекта совместно с BIM в сфере проектирования объемно-планировочных решений. Так как модели ИИ являются обучаемыми и настраиваемыми, т.е. возможно добавлять требования в части безопасности для их учета в проверках проектных решений при проектировании объекта.

На данный момент применение информационного моделирования внедряется на этапе строительства, что позволяет получать актуальные данные о процессе строительства и осуществлять строительный контроль на основе трехмерной информационной модели.

В работе [10] рассматривается обеспечение пожарной безопасности в высотных зданиях и системы управления пожаром на основе GIS и BIM.

В публикации [11] рассматривается технология BIM как драйвер развития цифровизации управления объектами и варианты интеграции всех систем современных технологий в процесс управления объектом.

В статье [12] описываются варианты применения BIM при выполнении спасательных и восстановительных работ во время и после чрезвычайных ситуаций (например, мониторинг воздействия природных факторов на объект, оценка вариантов местонахождения людей, оценка повреждений конструкций объекта).

Исследование задачи моделирования режима эвакуации людей. В работах [13–17] рассматриваются различные варианты использования BIM-технологий и «цифрового двойника» для конкретных задач безопасности в части мониторинга актуального состояния объекта, режимов эксплуатации, моделирования процессов и сценариев [18–22], возможных при эксплуатации объекта и для создания интеллектуальных систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре.

Работы содержат описание моделирования процесса эвакуации людей, расчетов времени эвакуации в зависимости от разных параметров движения людей, параметров конструкций и противопожарных систем как сегментов «умного дома».

В рамках данной статьи в общем случае сценарий применения BIM для целей оценки проектных решений на основе моделирования пожара по шагам представлен на рис. 3. Для реализации данного сценария нужно сформировать BIM-модель с пол-

ной и точной информацией о компонентах модели (геометрические данные, свойства и характеристики элементов и др). Для моделирования пожара необходимо:

- определить программные инструменты, в которых будет реализована симуляция пожара (распространения огня и дыма внутри здания и т.п.);
- определить данные BIM-модели, необходимые для симуляции пожара, и способы их интеграции в модель пожара.

По результатам симуляции пожара возможно определить путь распространения пожара внутри здания и наиболее незащищенные места в здании. Также возможно реализовать оценку эвакуации с учетом оптимальных путей эвакуации и выходов из здания. В результате симуляции и полученных данных можно выполнить проверку проектных решений по зданию на соответствие российским нормативам и стандартам безопасности, таким как СП 2.13130.2009¹. В случае неудовлетворительных результатов симуляции необходимо провести калибровку модели пожара и BIM-модели. При необходимости на основе полученных моделей симуляции и результатов можно провести физические эксперименты и тестирование, по результатам которых может быть выявлена потребность в корректировке моделей симуляции. По итогам результатов симуляций и тестирования может быть реализовано практическое применение полученных знаний.

Цифровая информационная модель как источник данных при эксплуатации объекта. С развитием «цифровых двойников» зданий и Интернета вещей появляется возможность получать актуальную информацию о состоянии объекта и события с визуализацией их точного места. BIM является одной из составляющих «цифрового двойника» здания.

На безопасность объекта кроме прочего влияет ухудшение состояние самого объекта в целом и снижение эффективности инженерных систем, отвечающих за безопасность объекта (рис. 4). Задачей эксплуатации в части обеспечения безопасности объекта является мониторинг состояния объекта и соблюдение требований к обслуживанию объекта и его систем, ремонту и своевременной модернизации элементов объекта при необходимости.

Важно формировать методологии применения BIM и «цифровых двойников» для оценки безопасности объектов строительства. Понимание того, как нужно применять и анализировать данные модели для оценки пожарной безопасности, позволит сформировать необходимый опыт и разработать программные продукты для работы в этом направлении.

¹ СП 2.13130.2009. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

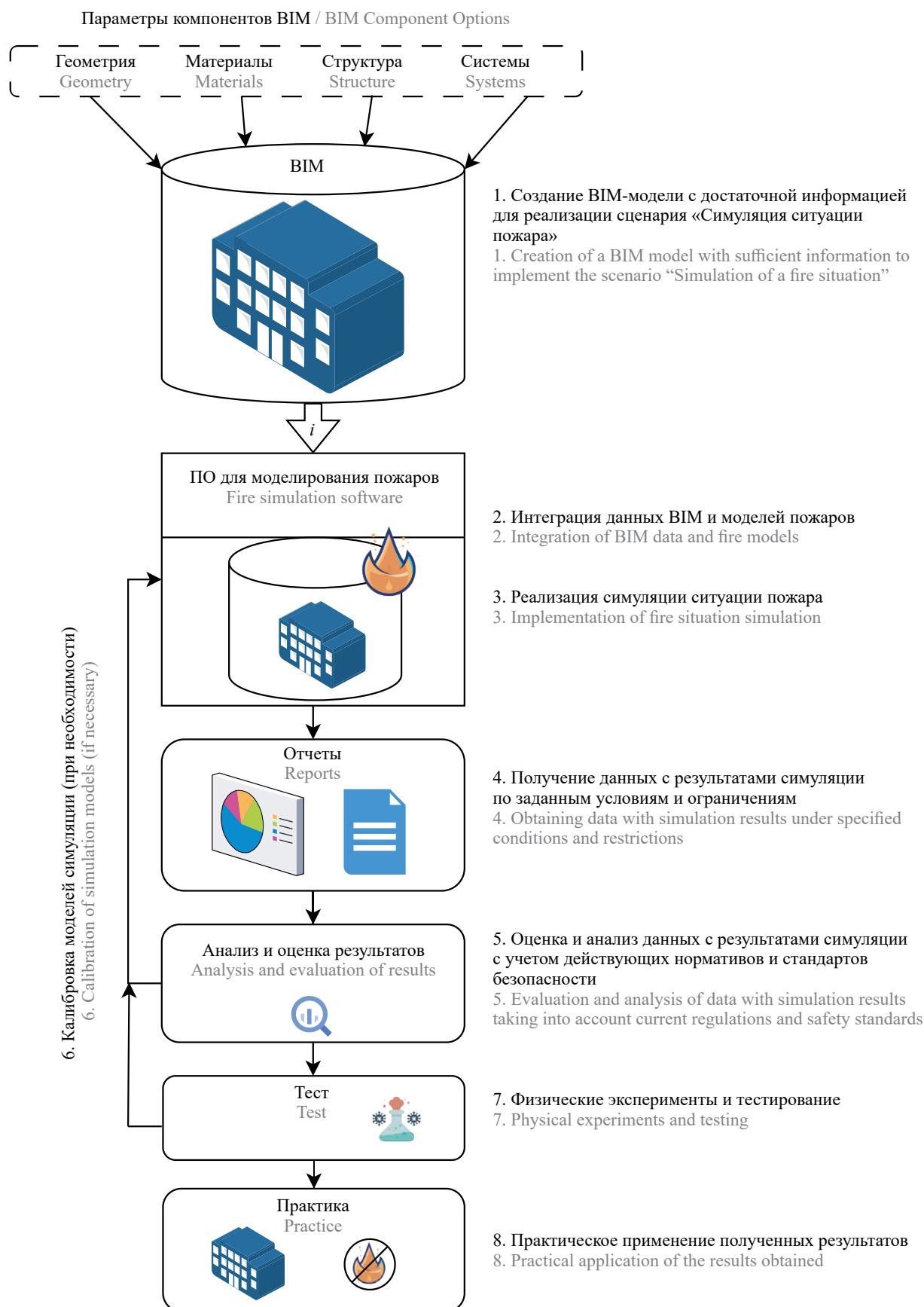


Рис. 3. BIM в сценарии симуляции пожара
Fig. 3. BIM in a fire simulation scenario



Рис. 4. Факторы, связанные с безопасностью

Fig. 4. Safety factors

Общая концепция развития «цифровых двойников» представлена на рис. 5. Согласно исследованию [23], выделяется четыре основных этапа развития «цифрового двойника». Первоначально создается модель геометрии, которая является базовой для построения модели физических процессов. На основе модели физических процессов формируется модель поведения объекта, которая позволяет понять правила, по которым объект отвечает на возмущения разного рода. После чего возможно прогнозирование

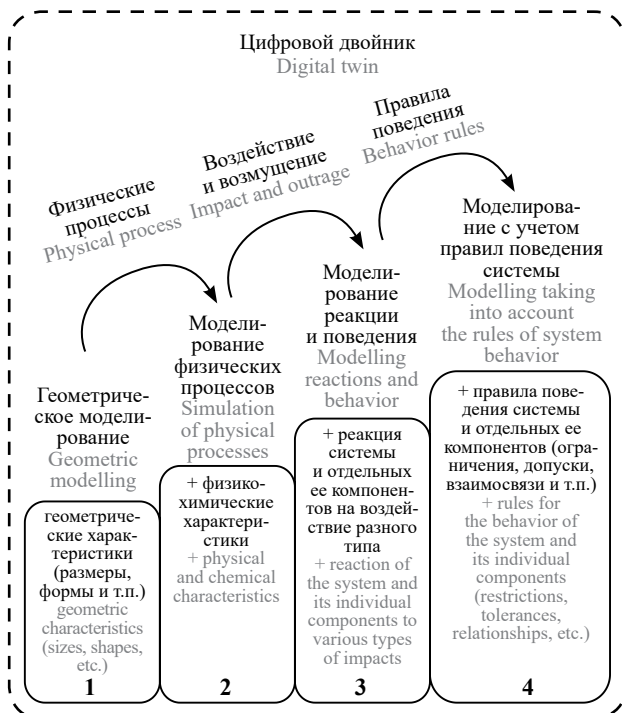


Рис. 5. Развитие «цифрового двойника»

Fig. 5. Development of a “digital twin”

состояния объекта и моделирование поведения объекта. Таким образом, можно говорить о применении «цифрового двойника» для целей диагностики проблем с оборудованием и прогнозного обслуживания.

Выводы

Внедрение новых технологий в любой сфере сопровождается трудностями, связанными с необходимостью наработки опыта применения таких технологий, получения достаточных данных, которые являются обоснованием целесообразности применения современных инструментов в традиционной практике.

Необходимо практическое изучение возможностей полноценного применения современных инструментов технологий информационного моделирования для повышения качества пожарной безопасности зданий, на основе которого будут определены возможности рассматриваемых инструментов.

Из текущих практик на данный момент цифровые информационные модели, разрабатываемые на стадии проектирования, позволяют автоматизировать процесс проверки проектных решений по нормативным требованиям [24], в том числе по требованиям пожарной безопасности.

Применение BIM для пожарных расчетов и моделирования процессов пожара и эвакуации мало распространено. Существуют проблемы интероперабельности между системами автоматизированного проектирования, где разрабатываются модели BIM, и расчетными программными комплексами, применяемыми специалистами по пожарной безопасности.

Также на данный момент важными ограничениями, затрудняющими цифровизацию области пожарной безопасности в строительстве, являются:

- отсутствие комплексного общепринятого метода оценки пожарной безопасности с показателями эффективности противопожарной системы [25, 26];
- трудности в описании некоторых бизнес-процессов, связанных с обеспечением пожарной безопасности на разных этапах жизненного цикла объекта.

Необходима наработка теоретического и практического опыта применения рассматриваемых информационных технологий для задач пожарной инженерии, что позволит:

- сформировать общий подход по согласованному применению указанных инструментов, в том числе совместно со смежными специалистами;
- определить требования к данным, формируемым рассматриваемыми инструментами, и определить способы анализа и применения этих данных для повышения качества применяемых решений в области обеспечения пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Danzi E., Flores-Quiroz N., Sharma A., Zhang T., Marshall L. Fire engineering for global grand challenges: Developing a 10-year strategic plan // Fire Protection Engineering. Q3. 2023. Vol. 99. URL: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/c2f91981-c014-4bec-97f4-1225586937ac/UploadedImages/Grand_Challenges/white_papers/SFPE_Foundation_GCI_White_Paper-Energy-Infrastructure.pdf
2. Wang L., Li W., Feng W., Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology // Building and Environment. 2021. Vol. 205. P. 108188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
3. Холицевников В.В., Парфененко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 66–94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94
4. Lovreglio R., Thompson P., Feng Z. Letter to the editor: Automation in fire safety engineering using BIM and generative design // Fire Technology. 2021. Vol. 58. Issue 1. DOI: 10.1007/s10694-021-01153-7
5. Малодушев С.В. Моделирование процесса эвакуации в зданиях с учетом количества и местоположения посетителей, определяемых с помощью мобильных устройств : дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2018. 149 с.
6. Kanangkaew S., Jokkaw N., Tongthong T. BIM-based and augmented reality combined with a real-time fire evacuation system for the construction industry // July 2023 Conference: The Fifth International Conference on Civil and Building Engineering Informatics at: Bangkok, Thailand. URL: https://www.researchgate.net/publication/372440739_BIM-BASED_AND_AUGMENTED_REALITY_COMBINED_WITH_A_REAL-TIME_FIRE_EVACUATION_SYSTEM_FOR_THE_CONSTRUCTION_INDUSTRY
7. Маковецкая-Абрамова О.В., Лунева С.К., Гаврюшина А.Г. BIM-технологии на службе обеспечения безопасности населения // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2020. № 2 (52). URL: <https://sciup.org/bim-tehnologii-na-sluzhbe-obespechenija-bezopasnosti-naselenija-148318844>
8. Дектерев П.Е., Завьялов В.А. Основные концепции интеграции информационных моделей объектов строительства и автоматизированных систем управления зданиями // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2016. № 12. DOI: 10.12737/22760
9. Гусарова А.А., Мокрова Н.В. Инструменты искусственного интеллекта для информационного моделирования строительных объектов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докл. II Национал. науч. конф. 8 декабря 2021 г. М. : НИУ МГСУ, 2022. С. 949–956.
10. Huangfu D., Rong L., Wei G. Application of high-rise building fire rescue based on BIM and GIS. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3626-7_6
11. Krämer M., Bender T., Bock N., Härtig M., Jaspers E., Koch S. et al. IT Environments for BIM in FM. 2023. DOI: 10.1007/978-3-658-40830-5_4. URL: https://www.researchgate.net/publication/371338321_IT_Environments_for_BIM_in_FM
12. Шеина С.Г., Новоселова И.В., Чернявский И.А. Организационно-технологические направления по восстановлению объектов после чрезвычайных ситуаций с использованием BIM-технологий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 (95). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7992>
13. Гусев С.С., Макаров В.В. Итерационные модели эвакуации людей из здания как компоненты «Умного дома» // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3 (37). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-114-122
14. Беляев Е.В., Головенко Е.Л., Калгатов С.С., Абдикаримов Е.С. Интеллектуальное управление эвакуацией людей при пожаре в здании на основе BIM-моделирования // Вестник науки и образования. 2021. № 8–2 (111).
15. Кантемиров А.Ю., Сажин И.С., Калгатов С.С., Душнюк Д.Н., Омурбаева Т.О. Моделирование эвакуации людей при пожаре в здании с массовым пребыванием людей // Проблемы науки. 2021. № 11 (168). С. 41–46.
16. Незамаев И.В., Сажин И.С., Калгатов С.С., Душнюк Д.Н. Моделирование и определение параметров процесса эвакуации людей при пожаре объекта защиты с массовым пребыванием людей // Вестник науки и образования. 2021. № 9–3 (112). С. 23–28.
17. Горбунов А.А., Терехин С.Н., Дали Ф.А. Применение интеллектуальной системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре на основе BIM-моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 3.
18. Wang J., Wei G., Dong X. A dynamic fire escape path planning method with BIM // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. Vol. 12. Pp. 1–13. DOI: 10.1007/s12652-020-02794-2
19. Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M., Wan F. Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 24. DOI: 12808.10.3390/app122412808
20. Liu M., Wang G. Indoor fire simulation in low-rise teaching buildings based on BIM-FDS // Fire. 2023. Vol. 6. Issue 5. P. 203. DOI: 10.3390/fire6050203

21. Liu Z., Gu X., Hong R. Fire protection and evacuation analysis in underground interchange tunnels by integrating BIM and numerical simulation // *Fire*. 2023. Vol. 6. Issue 4. P. 139. DOI: 10.3390/fire6040139
22. Kim D.-H., Shin H.-J., Cha H.-S. A Method to establish a fire information visualization structure for 3D/BIM-linked fire response system development // *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022. Vol. 38. Pp. 253–263. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.1.253
23. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital twin driven smart manufacturing // Academic Press. Singapore. 2019. P. 282.
24. Кузина О.Н. Верификация информационной модели здания на этапе перехода от проектной стадии к строительству (от d-BIM к c-BIM) // *Вестник евразийской науки*. 2017. № 6 (43). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/180TVN617.pdf>
25. Шихалев Д.В. Управленческий аспект в функционировании системы обеспечения пожарной безопасности объекта // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2021. № 2 (39).
26. Шихалев Д.В. Проблемы управления системой обеспечения пожарной безопасности объекта. Ч. 1. Методы оценки // *Проблемы управления*. 2022. № 1. DOI: 10.25728/ru.2022.1.1

REFERENCES

1. Danzi E., Flores-Quiroz N., Sharma A., Zhang T., Marshall L. Fire engineering for global grand challenges: Developing a 10-year strategic plan. *Fire Protection Engineering*. Q3. 2023; 99. URL: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/c2f91981-c014-4bec-97f4-1225586937ac/UploadedImages/Grand_Challenges/white_papers/SFPE_Foundation_GCI_White_Paper-Energy-Infrastructure.pdf2023
2. Wang L., Li W., Feng W., Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology. *Building and Environment*. 2021; 205:108188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
3. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. The correctness of the computer model and our life. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):66-94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94 (rus).
4. Lovreglio R., Thompson P., Feng Z. Letter to the editor: Automation in fire safety engineering using BIM and Generative Design. *Fire Technology*. 2021; 58(1). DOI: 10.1007/s10694-021-01153-7
5. Malodushev S.V. *Modeling the evacuation process in buildings taking into account the number and location of visitors determined using mobile devices : thesis of a candidate of technical sciences*. Petrozavodsk, 2018; 149. (rus).
6. Kanangkaew S., Jekkaw N., Tongthong T. BIM-based and augmented reality combined with a real-time fire evacuation system for the construction industry. *July 2023 Conference : The Fifth International Conference on Civil and Building Engineering Informatics at: Bangkok, Thailand*. URL: https://www.researchgate.net/publication/372440739_BIM-BASED_AND_AUGMENTED_REALITY_COMBINED_WITH_A_REAL-TIME_FIRE_EVACUATION_SYSTEM_FOR_THE_CONSTRUCTION_INDUSTRY
7. Makovetskaya-Abramova O.V., Luneva S.K., Gavryushina A.G. BIM-technologies on population security service. *Technical and technological problems of the service*. 2020; 2(52). URL: <https://sciup.org/bim-tehnologii-na-sluzhbe-obespecheniya-bezopasnosti-naseleniya-148318844> (rus).
8. Dekterev P.E., Zavyalov V.A. Fundamental concepts of integration of building information models and building management systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 12. DOI: 10.12737/22760 (rus).
9. Gusarova A.A., Mokrova N.V. Artificial intelligence tools for information modeling of construction projects. *Current problems of the construction industry and education : collection of reports of the Second National Scientific Conference, December 08, 2021*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2022; 949-956. (rus).
10. Huangfu D., Rong L., Wei G. *Application of High-Rise Building Fire Rescue Based on BIM and GIS*. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3626-7_6
11. Krämer M., Bender T., Bock N., Härtig M., Jaspers E., Koch S. et al. *IT Environments for BIM in FM*. 2023. DOI: 10.1007/978-3-658-40830-5_4. URL: https://www.researchgate.net/publication/371338321_IT_Environments_for_BIM_in_FM
12. Sheina S.G., Novoselova I.V., Chernyavsky I.A. Organizational and technological directions for the restoration of objects after emergency situations using BIM technologies. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022; 11(95). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7992> (rus).
13. Gusev S.S., Makarov V.V. Iterative models of evacuation of people from the building as components of the “smart home”. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021; 3(37). DOI 10.52684/2312-3702-2021-37-3-114-122 (rus).
14. Belyaev E.V., Golovenko E.L., Kalgatov S.S., Abdikarimov E.S. Intelligent evacuation management in a fire in a building based on bim modeling. *Bulletin of Science and Education*. 2021; 8-2(111). (rus).
15. Kantemirov A.Yu., Sazhin I.S., Kalgatov S.S., Dushnyuk D.N., Omurbaeva T.O. Modeling the evacuation of humanities in a fire in a building with a massive personee. *Problems of Science*. 2021; 11(168):41-46. (rus).

16. Nezamaev I.V., Sazhin I.S., Kalgatov S.S., Dushnyuk D.N. Modeling and determination of the parameters of the evacuation process of human beings in the fire of the protected object with mass stay of people. *Bulletin of Science and Education*. 2021; 9-3(112):23-28. (rus).
17. Gorbunov A.A., Terekhin S.N., Dali F.A. Use of intelligent warning system managements of evacuation of people for fire on basis of BIM-modelling. *Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2019; 3. (rus).
18. Wang J., Wei G., Dong X. A dynamic fire escape path planning method with BIM. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021; 12:1-13. DOI: 10.1007/s12652-020-02794-2
19. Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M., Wan F. Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM. *Applied Sciences*. 2022; 12:12808. DOI: 10.3390/app122412808
20. Liu M., Wang G. Indoor fire simulation in low-rise teaching buildings based on BIM-FDS. *Fire*. 2023; 6:203. DOI: 10.3390/fire6050203
21. Liu Z., Gu X., Hong R. Fire protection and evacuation analysis in underground interchange tunnels by integrating BIM and numerical simulation. *Fire*. 2023; 6:139. DOI: 10.3390/fire6040139
22. Kim D.-H., Shin H.-J., Cha H.-S. A method to establish a fire information visualization structure for 3D/BIM-linked fire response system development. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022; 38:253-263. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.1.253
23. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital twin driven smart manufacturing. *Academic Press*. Singapore, 2019; 282.
24. Kuzina O.N. Verification of a building information model at the stage of transition from the design stage to construction (from d-BIM to c-BIM). *Bulletin of Eurasian Science*. 2017; 6(43). (rus).
25. Shikhalev D.V. Management aspect in the functioning of the fire safety system of an object. *Modern problems of civil protection*. 2021; 2(39). (rus).
26. Shikhalev D.V. Problems of managing the fire safety system of a facility. Part I: Assessment methods. *Control Sciences*. 2022; 1:2-14. DOI: 10.25728/cs.2022.1.1 (rus).

Поступила 26.09.2023, после доработки 24.10.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received September 26, 2023; Received in revised form October 24, 2023;

Accepted November 15, 2023

Информация об авторе

ГУСАРОВА Алла Александровна, аспирант кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 94654; ORCID: 0000-0003-1940-1552; e-mail: 2609gaa@gmail.com

Information about the author

Alla A. GUSAROVA, Graduate Student of Department of Mechanization and Automation of Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 296055; ORCID: 0000-0003-1940-1552; e-mail: 2609gaa@gmail.com

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 47–55
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):47-55

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.47-55>

Экспериментальное определение показателей пожарной опасности технических масел в маломасштабных установках

Сергей Викторович Пузач¹✉, Руслан Гянджавиевич Акперов², Очир Баатрович Болдрушкиев², Кирилл Петрович Щетнев², Елена Николаевна Косьянова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Отсутствие свойств современных технических масел не позволяет провести расчет времени блокирования путей эвакуации в помещениях, где они находятся. Это может привести к серьезной недооценке пожарной опасности объектов. Поэтому задача определения пожароопасных свойств современных технических масел является актуальной.

Цели и задачи. Целью работы является экспериментальное определение показателей пожарной опасности современных технических масел, используемых на гидростанциях и предприятиях Газпромнефти.

Для достижения цели были проведены экспериментальные исследования образцов вышеуказанных масел по определению их пожароопасных свойств.

Методы. Используется экспериментальный метод исследования пожароопасных свойств веществ и материалов в маломасштабной экспериментальной установке, а также стандартный метод испытаний по определению коэффициента дымообразования в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89. Проведен анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. Проведены испытания технических масел марок «Mobil DTE 10 EXCEL 68», «Mobil DTE OIL PM 150» и «Газпромнефть PM-220».

Получены экспериментальные зависимости от времени с начала испытаний удельной массовой скорости выгорания, удельных коэффициентов образования монооксида и диоксида углерода, циановодорода, удельного коэффициента потребления кислорода, а также дымообразующей способности.

Обнаружено, что первоначальная масса образца существенно влияет на величину массовой скорости выгорания.

Выполнено сравнение полученных характеристик процесса горения масел с данными, приведенными в существующей базе данных горючей нагрузки. Показано, что массовая скорость выгорания испытываемых масел существенно меньше соответствующей величины для масел, приведенных в базе данных.

Выводы. Полученные впервые удельные коэффициенты образования циановодорода, а также остальные опытные данные могут использоваться при расчете времени блокирования путей эвакуации в производственных помещениях, где находятся технические масла.

Ключевые слова: пожар; циановодород; монооксид углерода; парциальная плотность; токсичность; скорость выгорания

Для цитирования: Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Щетнев К.П., Косьянова Е.Н. Экспериментальное определение показателей пожарной опасности технических масел в маломасштабных установках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 47–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.47-55.

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

Experimental determination of fire hazard indicators of technical oils in small-scale installations

Sergey V. Puzach¹✉, Ruslan G. Akperov², Ochir B. Boldrushkiev², Kirill P. Shchetnev², Elena N. Kosyanova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. Lack of properties of modern technical oils does not allow calculating the time of blocking of evacuation routes in the premises where they are located. It can lead to serious underestimation of fire danger of objects. Therefore, the task of determining the fire hazard properties of modern technical oils is urgent.

Goals and objectives. The purpose of the work is the experimental determination of fire-hazard indicators of modern technical oils used at hydraulic plants and Gazpromneft enterprises.

In order to achieve the goal, the experimental research of samples of the above mentioned oils was carried out to determine their fire-hazard characteristics.

Methods. The experimental method of studying of fire hazardous properties of substances and materials in a small-scale experimental unit, as well as the standard test method for determining the smoke formation coefficient in accordance with GOST 12.1.044–89 was used. The obtained results were analyzed.

Results and discussion. Technical oils of the “Mobil DTE 10 EXCEL 68”, “Mobil DTE OIL PM 150” and “Gazpromneft PM-220” brands were tested.

Experimental dependences of specific mass burnout rate, specific coefficients of formation of carbon monoxide and dioxide, cyanogenic hydrogen, specific coefficient of oxygen consumption, as well as smoke generating ability on time from the beginning of the tests were obtained.

It was found that the initial mass of the sample significantly affects the value of mass burnout rate.

The obtained characteristics of the oil combustion process were compared with the data given in the existing database of combustible load. It is shown that the mass burnout rate of the tested oils is significantly less than corresponding value for the oils given in the database.

Conclusion. Specific coefficients of hydrogen cyanide formation obtained for the first time, as well as other experimental data, can be used for calculation of the time of blocking of evacuation routes in production premises where technical oils are located.

Keywords: fire; hydrogen cyanide; carbon monoxide; partial density; toxicity; burnout rate

For citation: Puzach S.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Shchetnev K.P., Kosyanova E.N. Experimental determination of fire hazard indicators of technical oils in small-scale installations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):47-55. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.47-55. (rus).

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

Введение

С учетом развития промышленной индустрии и роста потребности в электроэнергии различных отраслей наблюдается активное строительство производственно-промышленных объектов.

Значительную пожарную опасность представляют объекты, реализующие технологический процесс с обращающимися легковоспламеняющимися и горючими жидкостями. Наличие большого количества легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в помещениях производственного объекта способствует возникновению условий взрывоопасной концентрации при возникновении различных аварийных ситуаций [1–5].

В случае мгновенного воспламенения разлива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей динамика распространения опасных факторов пожара в помещениях производственных объектов может протекать значительно быстрее процесса эвакуации людей из здания [6–8]. Так, при проведении натурных экспериментов по горению турбинного масла площадью разлива 5 м² наблюдалось полное задымление машинного зала площадью 8000 м² в течение 5 мин.

Таким образом, оценка пожароопасных свойств технических масел является актуальной научно-технической задачей.

Данные о пожароопасных свойствах технических масел представлены в базе данных типовой

пожарной нагрузки [9]. Однако в вышеуказанной базе приведены характеристики только двух масел: индустриальное и турбинное масла. При этом не указана точная их маркировка.

В литературных источниках [2–18] приведены лишь отдельные характеристики современных масел, не позволяющие оценить в полной мере их пожарную опасность.

Отсутствие свойств современных технических масел не позволяет провести расчет времени блокирования путей эвакуации в помещениях, где они находятся. Это может привести к серьезной недооценке пожарной опасности объектов. Поэтому задача определения пожароопасных свойств современных технических масел является актуальной.

Целью работы является экспериментальное определение показателей пожарной опасности современных технических масел, используемых на гидростанциях и предприятиях Газпромнефти.

Для достижения цели были проведены экспериментальные исследования образцов вышеуказанных масел по определению в маломасштабной опытной установке [19, 20] удельной массовой скорости выгорания, дымообразующей способности, удельных коэффициентов образования токсичных газов и удельного коэффициента потребления кислорода.

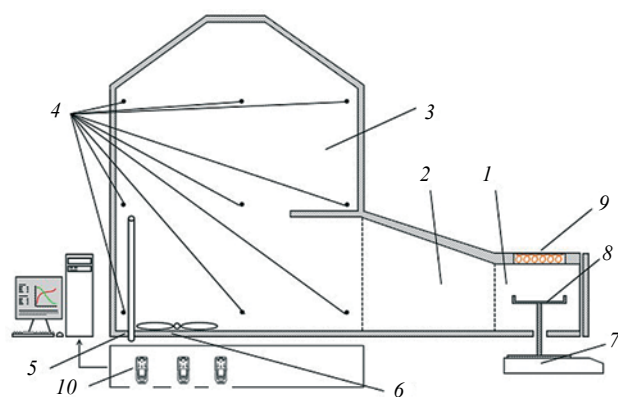


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — термопары; 5 — зонд отбора газа; 6 — вентилятор; 7 — электронные весы; 8 — держатель образца; 9 — электронагревательный элемент; 10 — газоаналитическое оборудование

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 — combustion chamber; 2 — transitional hose; 3 — exposure chamber; 4 — thermocouples; 5 — gas sampling probe; 6 — fan; 7 — electronic scales; 8 — sample holder; 9 — electric heating element; 10 — gas analysis equipment

Экспериментальные установки

Для определения показателей пожарной опасности технических масел используются следующие экспериментальные установки:

- установка для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [19, 20];
- стандартная установка по ГОСТ 12.1.044–89¹.

Схема экспериментальной установки, представленной в работах [19, 20], изображена на рис. 1.

Регистрация концентрации токсичных продуктов горения осуществлялась посредством работы многоканальных газоанализаторов, определяющих концентрации следующих газов:

- диоксид углерода (CO_2) с диапазоном измерений от 0 до 5 % об.;
- монооксид углерода (CO) с диапазоном измерений от 0 до 1 % об.;
- циановодород (HCN) с диапазоном измерений от 0 до 0,01 % об.;
- кислород (O_2) с диапазоном измерений от 0 до 21 % об.

Методика проведения экспериментов

Массы исследуемых образцов в процессе проведения испытаний определялись с помощью электронных весов 7 марки AND GF-6100, имеющих погрешность измерений не более ± 1 мг.

¹ ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18. Метод экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов.

Сначала производился запуск электронагревательного элемента до достижения плотности падающего на поверхность образца теплового потока 10 кВт/м^2 . При установлении статичной величины плотности падающего теплового потока производится запуск регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков.

Выбор плотности теплового потока обусловлен минимальным значением плотности теплового потока, при которой начинался пламенный режим горения.

После установления заданной плотности падающего теплового потока и запуска регистрирующих программ подготовленный и предварительно взвешенный образец масла помещался в держатель для образцов, размещенный в камере сгорания.

Воспламенение образца было произведено с помощью поднесенной к поверхности образца газовой горелки.

Удельные коэффициенты образования HCN (L_{HCN}), CO (L_{CO}), CO_2 (L_{CO_2}), а также поглощения кислорода (L_{O_2}) в каждый момент времени рассчитываются по следующим выражениям [1]:

$$L_{\text{HCN}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{HCN}}}{d\tau}; \quad (1)$$

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}; \quad (2)$$

$$L_{\text{CO}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}_2}}{d\tau}; \quad (3)$$

$$L_{\text{O}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau}, \quad (4)$$

где V — объем экспозиционной камеры, м^3 ;

Ψ — массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ;

ρ_{HCN} , ρ_{CO} , ρ_{CO_2} , ρ_{O_2} — соответственно, среднееобъемная плотность HCN , CO , CO_2 и O_2 в экспозиционной камере, кг/м^3 .

Исходные данные

В качестве исследуемых масел взяты технические масла марок «Mobil DTE 10 EXCEL 68», «Mobil DTE OIL PM 150» и «Газпромнефть PM-220».

Площадь образцов для испытаний составляла $0,01 \text{ м}^2$.

Первоначальная масса образцов изменялась в зависимости от измеряемых параметров процесса горения. Это связано с тем, что при измерении дымообразующей способности в стандартной установке масса образца должна быть существенно меньше, чем в случае измерения удельной скорости выгорания, удельных коэффициентов образования токсичных газов и удельного коэффициента потребления кислорода.

Экспериментальная установка [19, 20] позволяет проводить одновременные измерения вышеуказанных параметров. Однако при размере образца порядка $0,1 \times 0,1$ м (максимальный размер держателя образца) происходит быстрый выход величины оптической плотности дыма за верхний предел измерений датчика. При этом парциальные плотности токсичных газов и кислорода находятся внутри диапазонов измерений соответствующих датчиков.

Фотографии образцов масла до и после проведения экспериментов в опытной установке [19, 20] представлены на рис. 2.



a



b

Рис. 2. Фотографии образца масла: а — перед экспериментом; б — после эксперимента

Fig. 2. Photos of the oil specimen: a — before the experiment; b — after the experiment

Образование токсичных газов

Огневые испытания проводились на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [19, 20] при плотности падающего на поверхность образца теплового потока 10 кВт/м^2 в режиме горения.

Измерения удельных коэффициентов образования токсичных газов и удельного коэффициента потребления кислорода проводились при первоначальной массе образца масла:

- Mobil DTE OIL PM 150: $m = 11,69 \dots 13,93$ г;
- Mobil DTE 10 Excel: $m = 13,65 \dots 13,95$ г;
- Газпромнефть РМ-220: $m = 11,171 \dots 11,873$ г.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1–4.

Из табл. 1–4 видно, что испытываемые масла по сравнению с маслами в базе данных [1] имеют:

- более высокий удельный коэффициент образования диоксида углерода (более чем в 2 раза);
- более низкий удельный коэффициент образования оксида углерода (более чем в 1,4 раза);
- близкие значения удельного коэффициента потребления кислорода.

Таблица 1. Удельные коэффициенты образования оксида углерода

Table 1. Specific coefficients of carbon monoxide formation

Марка масла Oil brand	L_{CO} , кг/кг (средние значения) L_{CO} , kg/kg (mean values)	L_{CO} , кг/кг (максимальные значения) L_{CO} , kg/kg (maximum values)
Mobil DTE OIL PM 150	0,028...0,053 0,045*	0,072...0,084 0,078*
Mobil DTE 10 Excel	0,048...0,064 0,058*	0,081...0,109 0,097*
Газпромнефть РМ-220 Gazpromneft RM-220	0,032...0,071 0,053*	0,062...0,099 0,088*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	0,122	—
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	0,122	—

Примечание: здесь и в табл. 2–4: * — средние значения по результатам пяти экспериментов; — нет данных.

Note: here and in the Table 2–4: * — mean values based on the results of five experiments; — no data.

Таблица 2. Удельные коэффициенты образования диоксида углерода**Table 2.** Specific coefficients of carbon dioxide formation

Марка масла Oil brand	L_{CO_2} , кг/кг (средние значения) L_{CO_2} , kg/kg (mean values)	L_{CO_2} , кг/кг (максимальные значения) L_{CO_2} , kg/kg (maximum values)
Mobil DTE OIL PM 150	1,63...2,09 1,87*	2,71...2,88 2,80*
Mobil DTE 10 Excel	1,86...2,02 1,94*	2,59...2,95 2,77*
Газпромнефть PM-220 Gazpromneft RM-220	1,40...1,78 1,55*	2,72...3,11 2,84*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	1,07	–
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	0,7	–

Таблица 3. Удельные коэффициенты образования циановодорода**Table 3.** Specific coefficients of hydrogen cyanide formation

Марка масла Oil brand	L_{HCN} , кг/кг (средние значения) L_{HCN} , kg/kg (mean values)	L_{HCN} , кг/кг (максимальные значения) L_{HCN} , kg/kg (maximum values)
Mobil DTE OIL PM 150	0,000223...0,000489 0,000359*	0,000463...0,000693 0,000585*
Mobil DTE 10 Excel	0,000376...0,000583 0,000487*	0,00053...0,000924 0,000732*
Газпромнефть PM-220 Gazpromneft RM-220	0,000349...0,000724 0,000478*	0,000464...0,000826 0,000697*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	–	–
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	–	–

Таблица 4. Удельные коэффициенты потребления кислорода**Table 4.** Specific coefficients of oxygen consumption

Марка масла Oil brand	L_{CO_2} , кг/кг (средние значения) L_{CO_2} , kg/kg (mean values)	L_{CO_2} , кг/кг (максимальные значения) L_{CO_2} , kg/kg (maximum values)
Mobil DTE OIL PM 150	–1,637...–1,951 –1,834*	–2,689...–2,967 –2,831*
Mobil DTE 10 Excel	–1,445...–1,758 –1,601*	–2,545...–2,217 –2,338*
Газпромнефть PM-220 Gazpromneft RM-220	–1,611...–2,125 –1,882*	–2,832...–3,11 –2,995*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	–1,589	–
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	–2,82	–

Дымообразующая способность

Экспериментальное определение дымообразующей способности материала проводилось в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18¹.

Измерения дымообразующей способности проводились при первоначальной массе образца масла:

- Mobil DTE OIL PM 150: $m = 3,0...3,05$ г;
- Mobil DTE 10 Excel: $m = 3,48...3,51$ г;
- Газпромнефть PM-220: $m = 3,06...3,21$ г.

При больших значениях масс образцов показания датчика светового потока выходили за верхний предел измерений.

Плотность падающего на поверхность образца теплового потока составляла 10 кВт/м², что обеспечивало режим горения.

Результаты экспериментов приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что испытываемые масла по сравнению с маслами в базе данных [1] имеют более высокую дымообразующую способность (например, по сравнению с турбинным маслом более чем в 2 раза).

Массовая скорость выгорания

Огневые испытания проводились на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [19, 20].

Измерения массовой скорости выгорания проводились при различных величинах первоначальной массы образца масла.

Таблица 5. Дымообразующая способность
Table 5. Smoke-generating capacity

Марка масла Oil brand	D_m , м ² /кг (средние значения) D_m , m ² /kg (mean values)
Mobil DTE OIL PM 150	505...600 579*
Mobil DTE 10 Excel	423...641 517*
Газпромнефть РМ-220 Gazpromneft RM-220	480...588 543*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	480
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	243

* — средние значения по результатам пяти экспериментов.

* — mean values from the results of five experiments.

Экспериментальные значения удельной массы скорости выгорания с указанием первоначальной массы образцов представлены в табл. 6.

Зависимости массовой скорости выгорания от времени проведения экспериментов представлены на рис. 3.

Из рис. 3 и табл. 6 видно, что:

- первоначальная масса образца существенно влияет на величину массовой скорости выгорания (например, в случае масла марки Mobil DTE OIL PM 150, увеличение массы примерно в 3,8 раза, массовая скорость выгорания увеличивается в 2,87 раза);
- массовая скорость выгорания испытываемых масел существенно меньше соответствующей величины для масел, приведенных в базе данных (например, в случае масла марки Mobil DTE OIL PM 150 вышеуказанная скорость меньше в 4,1 раза, чем для индустриального масла).

Выводы

Полученные впервые удельные коэффициенты образования циановодорода, а также остальные опытные данные по пожароопасным свойствам современных технических масел могут использоваться при расчете пожарных рисков в производственных помещениях, где находятся вышеуказанные масла.

Одновременное измерение на одном образце технического масла удельной массовой скорости выгорания, удельных коэффициентов образования токсичных газов, удельного коэффициента

Таблица 6. Удельная массовая скорость выгорания
Table 6. Specific mass burnout rate

Марка масла Oil brand	Первоначальная масса образца, г Initial weight of the sample, g	$\Psi_{уд}$, кг/(м ² ·с) (средние значения) $\Psi_{спец}$, kg/(m ² ·s) (mean values)
Mobil DTE OIL PM 150	11,69...13,93	0,00312...0,004121 0,00362*
	48,66...51,24	0,0058...0,015 0,0104*
Mobil DTE 10 Excel	13,65...13,95	0,005319...0,007683 0,0065*
	49,45...53,92	0,0104...0,0133 0,012*
Газпромнефть РМ-220 Gazpromneft RM-220	11,171...11,873	0,004925...0,005867 0,0054*
	50,357	0,0038*
Индустриальное масло [1] Industrial oil [1]	—	0,043
Турбинное масло ТП-22 [1] Turbine oil TP-22 [1]	—	0,03

* — средние значения по результатам пяти экспериментов.

* — mean values from the results of five experiments.

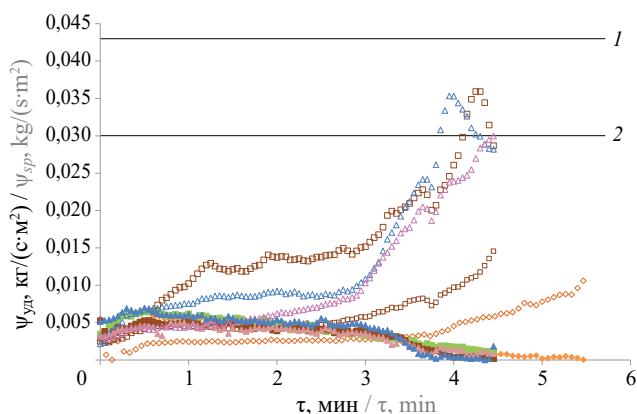


Рис. 3. Зависимость удельной массовой скорости выгорания различных трансформаторных масел от времени горения: Mobil DTE OIL PM 150:

□ — исходная масса масла $m = 48,66...1,24$ г; ■ — $m = 11,69...13,93$ г; Mobil DTE 10 Excel: △ — $m = 49,45...53,92$ г; ▲ — $m = 13,65...13,95$ г; Газпромнефть РМ-220: ◇ — $m = 50,357$ г; ◆ — $m = 11,171...11,873$ г;

1 — индустриальное масло [1]; 2 — турбинное масло ТП-22 [1]

Fig. 3. Dependence of specific mass burnout rate of different transformer oils on burning time:

Mobil DTE OIL PM 150:

□ — initial oil mass $m = 48.66...51.24$ g; ■ — $m = 11.69...13.93$ g; Mobil DTE 10 Excel: △ — $m = 49.45...53.92$ g; ▲ — $m = 13.65...13.95$ g; Gazpromneft RM-220: ◇ — $m = 50.357$ g; ◆ — $m = 11.171...11.873$ g;

1 — industrial oil [1]; 2 — turbine oil TP-22 [1]

потребления кислорода, а также дымообразующей способности невозможно, так как масса образца для измерения дымообразующей способности по результатам проведенных экспериментов должна быть примерно в 4 раза меньше, чем при измерении остальных параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alkış S., Aksoy E., Akpınar K. Risk assessment of industrial fires for surrounding vulnerable facilities using a multi-criteria decision support approach and GIS // *Fire*. 2021. № 4 (3). P. 13. DOI: 10.3390/fire4030053
2. Phillips W.D. A comparison of fire-resistant hydraulic fluids for hazardous industrial environments. Part I. Fire resistant and lubrication properties // *Journal of Synthetic Lubrication*. 2006. Vol. 14. Pp. 211–235. DOI: 10.1002/jsl.3000140302
3. Clark G.H. Firefighting equipment for Bulk users of Lubricating and Electrical oils. Part I // *Industrial lubrication and tribology*. 1954. Vol. 6. Pp. 15–21.
4. Sefouhi L., Bahmed L. Risk assessment of industrial waste: case of an Algerian company // *Case studies environment*. 2023. Vol. 7 (1). P. 2001786. DOI: 10.1525/cse.2023.2001786
5. Keerthi Narayanan D., Abdur Ravoof A., Jayapriya J., Revathi G., Murugan M. Hazards in oil, gas, and petrochemical industries // *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries*. 2023. Pp. 71–99. DOI: 10.1016/B978-0-323-95154-8.00010-4
6. Monashkov V., Russkova I., Loginova Y., Rumyantseva N., Uljanov A. Evaluation of explosive parameters of fuel oil additive manufacturing technology // *Conference series: earth and environmental science*. 2021. P. 052017. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052017
7. Sun W., You F., Ping L. Fire hazard assessment of typical flammable liquid oils in wind turbine nacelle // *The proceedings of 11th Asia-Oceania symposium on fire science and technology*. 2018. Pp. 405–417. DOI: 10.1007/978-981-32-9139-3_30
8. Romp H.A. Oil burning — Springer science + business media. 2013. 336 p.
9. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С., Нгуен Т.Х. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. 148 с.
10. Аксенов С.Г., Сиганатуллин Ф.К., Багышев Д.Э. Пожарная безопасность на силовых трансформаторах // *Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика : мат. II Всеросс. науч.-практ. конф.* 2020. С. 66–75.
11. Халиков Р.В., Робенко В.В. Пожарная опасность энергетических установок газоконденсаторных станций // *Пожарная и промышленная безопасность*. 2022. Вып. 1 (95). С. 66–76. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.66-76
12. Пожаркова И.Н., Елфимова М.В., Лагунов А.Н. Моделирование пожара в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2019. Вып. 1 (12). С. 39–45.
13. Акперов Р.Г., Пузач С.В. Выделение и распространение токсичных продуктов горения при пожарах в зданиях ГЭС // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. С. 17–20. EDN: RAJJJF.
14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. М. : Асс. Пожнаука, 2004. 713 с.
15. Исаева Л.К. Экологические последствия пожаров. М. : ВНИИПШ МВД СССР, 1990. 107 с.
16. Микеев А.К. Противопожарная защиты АЭС. М. : Энергоатомиздат, 1990. 430 с.
17. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-механические основы развития и тушения пожаров. М. : ВНИИПШ МВД СССР, 1980. 255 с.
18. Гусейнова Э.А. Энерго-экологическая эффективность горения отработанного индустриального масла // *Заметки ученого*. 2021. С. 371–377. EDN: FLZLCF.
19. Болдрушкиев О.Б., Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода при пожаре в помещении // *Безопасность жизнедеятельности*. 2019. № 10. С. 31–36.
20. Пузач С.В., Доан В.М., Нгуен Т.Д., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. 130 с.

REFERENCES

1. Alkış S., Aksoy E., Akpınar K. Risk Assessment of industrial fires for surrounding vulnerable facilities using a multi-criteria decision support approach and GIS. *Fire*. 2021; 4(3):13. DOI: 10.3390/fire4030053
2. Phillips W.D. A comparison of fire-resistant hydraulic fluids for hazardous industrial environments. Part I. Fire resistant and lubrication properties. *Journal of Synthetic Lubrication*. 2006; 14:211-235. DOI: 10.1002/jsl.3000140302

3. Clark G.H. Firefighting equipment for Bulk users of Lubricating and Electrical oils. Part I. *Industrial lubrication and tribology*. 1954; 6:15-21.
4. Sefouhi L., Bahmed L. Risk assessment of industrial waste: case of an Algerian company. *Case studies environment*. 2023; 7(1):2001786. DOI: 10.1525/cse.2023.2001786
5. Keerthi Narayanan D., Abdur Ravoof A., Jayapriya J., Revathi G., Murugan M. Hazards in oil, gas, and petrochemical industries. *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries*. 2023; 71-99. DOI: 10.1016/B978-0-323-95154-8.00010-4
6. Monashkov V., Russkova I., Loginova Y., Rumyantseva N., Uljanov A. Evaluation of explosive parameters of fuel oil additive manufacturing technology. *Conference series: earth and environmental science*. 2021; 052017. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052017
7. Sun W., You F., Ping L. Fire hazard assessment of typical flammable liquid oils in wind turbine nacelle. *The proceedings of 11th Asia-Oceania symposium on fire science and technology*. 2018; 405-417. DOI: 10.1007/978-981-32-9139-3_30
8. Romp H.A. *Oil burning — Springer science + business media*. 2013; 336.
9. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Nguen Than Hai. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2021; 148. (rus).
10. Aksenov S.G., Siganatullin F.K., Bagyshev D.E. Fire safety on power transformers. *Modern problems of fire safety: theory and practice : Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2020; 66-75 (rus).
11. Khalikov R.V., Royenko V.V. Fire hazard of power plants of gas compressor stations. *Pozharnaya i promyshlennaya bezopasnost. Fire and industrial safety*. 2020; 1(95):66-76. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.66-76 (rus).
12. Pozharkova I.N., Yelfimova M.V., Lagunov A.N. Modeling of fire in engine rooms of thermal power complex facilities. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2019; 1(12):39-45. (rus).
13. Akperov R.G., Puzach S.V. Release and distribution of toxic combustion products during fires in hydroelectric power station buildings. *News from Yufu. Technical science*. 2013; 17-20 (rus).
14. Korolchenko A.Ya. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : handbook*. Moscow, Fire science Publ., 2004; 713. (rus).
15. Isaeva L.K. *Ecological consequences of fires*. Moscow, VIPTSH MVD SSSR, 1990; 107. (rus).
16. Mikeyev A.K. *Fire protection of nuclear power plants*. Moscow, Energy Atomic Publ, 1990; 430. (rus).
17. Abduragimov I.M., Govorov V.Yu., Makarov V.Ye. *Physico-mechanical basis for the development and extinguishing of fires*. Moscow, VIPTSH MVD SSSR, 1980; 255. (rus).
18. Guseynova E.A. Energy and environmental efficiency of combustion of waste industrial oil. *Scientist's Notes*. 2021; 371-377 (rus).
19. Boldrushkiev O.B., Puchaz S.V., Sulejkin E.V. Determination of the specific formation coefficient and critical partial density of hydrogen cyanide in case of a fire in a room. *Life safety*. 2019; 10:31-36. (rus).
20. Puzach S.V., Doan V.M., Nguen T.D., Sulejkin E.V., Akperov R.G. *Formation, distribution and human exposure to toxic combustion products during a fire in a room*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017; 130 (rus).

Поступила 19.09.2023, после доработки 02.10.2023;

принята к публикации 17.10.2023

Received September 19, 2023; Received in revised form October 2, 2023;

Accepted October 17, 2023

Информация об авторах

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

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Information about the authors

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

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of Engineering Thermophysics and Hydraulics, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

БОЛДРУШКИЕВ Очир Баатрович, канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела проблем профилактики объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru

ШЕТНЕВ Кирилл Петрович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отделения планирования, организации и координации научных исследований отдела организации научных исследований Центра организации научных исследований и научной информации, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1122948; ORCID: 0000-0002-6103-1682; e-mail: shetnev.kirill2015@yandex.ru

КОСЬЯНОВА Елена Николаевна, старший научный сотрудник отделения планирования, организации и координации научных исследований отдела организации научных исследований Центра организации научных исследований и научной информации, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 766422; ORCID: 0000-0002-1333-2704; e-mail: elenkoss@yandex.ru

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

Ochir B. BOLDRUSHKIEV, Cand. Sci. (Eng.), Researcher of Research Department for Problems of Prevention of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru

Kirill P. SHCHETNEV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Separation of Planning, Organization and Coordination of Scientific Research, Department of Organization of Scientific Research, Center for Organization of Scientific Research and Scientific Information, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 1122948; ORCID: 0000-0002-6103-1682; e-mail: shetnev.kirill2015@yandex.ru

Elena N. KOSYANOVA, Senior Researcher of Separation of Planning, Organization and Coordination of Scientific Research, Department of Organization of Scientific Research, Center for Organization of Scientific Research and Scientific Information, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 766422; ORCID: 0000-0002-1333-2704; e-mail: elenkoss@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflicts of interests.

Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой

Сергей Порфирьевич Антонов^{1, 2}, Анатолий Никитович Гаращенко^{1✉},
Владимир Ильич Голованов³, Николай Сергеевич Новиков³

¹ ООО «ПРОЗАСК», г. Москва, Россия

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

³ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены варианты и особенности решения актуальной задачи по предотвращению взрывообразной потери целостности (ВПЦ) бетона и обеспечению требуемой огнестойкости железобетонных конструкций (ЖБК) за счет использования полипропиленовой микрофибры (ППМФ) в составе бетона или средств конструктивной огнезащиты.

Цель и задачи. Обоснование выбора эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости конструкций. Организация и проведение огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой при наличии и отсутствии ППМФ в составе бетона, а также при использовании конструктивной огнезащиты. Анализ результатов и вариантов их практического использования.

Методы. Оценка огнестойкости колонн и плит проводилась в ходе испытаний в огневой печи образцов под нагрузкой с дополнительными термодинамическими измерениями для их использования в ходе теплотехнического анализа. Он проводился с использованием апробированных несложных методик и программ расчетов температурных полей в конструкциях. Предложен порядок определения теплофизических характеристик материалов конструктивной огнезащиты в рабочем диапазоне температур.

Результаты. Представлены и обобщены результаты уникальных огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит под нагрузкой. Продемонстрирована эффективность использования ППМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнесохранности при воздействии по стандартному и углеводородному режиму. Представлены примеры эффективного использования конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» для обеспечения высоких пределов огнестойкости ЖБК. В ходе новой серии испытаний железобетонных плит, впервые проведенных при углеводородном режиме воздействия, установлено, что при использовании ППМФ время достижения образцами предельного состояния превышает 120 мин, а при использовании конструктивной огнезащиты — 240 мин. Показана возможность пересчета (в том числе снижения) толщин огнезащиты, используемых при испытаниях. Это обосновывается теплотехническими расчетами, для которых предусмотрено получение новых данных по теплофизическим характеристикам материалов огнезащиты в рабочем диапазоне температур.

Выводы. Предложена методология комплексных исследований, проведен значительный объем уникальных огневых и прочих экспериментов с теплотехническим анализом их результатов. Получен значительный объем важной информации, необходимой для предотвращения взрывообразного разрушения и обеспечения заданной огнестойкости несущих ЖБК. Представлены рекомендации по дальнейшему проведению экспериментальных и теоретических исследований и использованию полученных результатов при проектировании и изготовлении железобетонных конструкций, средств их огнезащиты, а также при корректировке нормативных документов по ЖБК.

Ключевые слова: конструктивная огнезащита; предел огнестойкости; стандартный режим воздействия; углеводородный режим воздействия; теплотехнические расчеты; статическая нагрузка; теплофизические характеристики

Для цитирования: Антонов С.П., Гаращенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 56–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.56-68

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

Prediction of fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfibre or fire protection

Sergey P. Antonov^{1, 2}, Anatoliy N. Garashchenko¹ ✉, Vladimir I. Golovanov³, Nikolay S. Novikov³

¹ PROZASK, LLC, Moscow, Russian Federation

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

³ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The options and features of solving the actual problem of preventing explosive loss of integrity of concrete and ensuring the required fire resistance of reinforced concrete structures (RCS) through the use of polypropylene microfibre (PPMF) in concrete or structural fire protection products are considered.

Goal and objectives. Justification of the choice of effective methods to prevent explosive loss of concrete integrity and ensure the given fire resistance of structures. Organization and carrying out of fire tests of reinforced concrete columns and floor slabs under load in the presence and absence of PPMF in the concrete composition, as well as with the use of structural fire protection. Analysis of the results and variants of their practical use.

Methods. The fire resistance of columns and slabs was assessed by testing specimens under load in a fired furnace with additional thermocouple measurements. It was carried out using approved simple methods and programmes for calculating temperature fields in structures. The procedure for determining the thermophysical characteristics of structural fire protection materials in the operating temperature range was proposed.

Results. The results of unique fire experiments of load-bearing columns and slabs are presented and summarized. The effectiveness of the use of PPMF is demonstrated, as well as the role of fire protection preventing loss of integrity in structures and increasing their fire resistance and fire protection under standard and hydrocarbon exposure. Examples of the effective use of structural fire protection in the form of "PROZASK Firepanel" slabs and "IGNIS LIGHT" plaster are presented to ensure high fire resistance limits of concrete. In the course of a new series of reinforced concrete slabs tests, for the first time carried out under hydrocarbon mode of exposure, it was found that when using PPMF, the time of reaching the limit state of specimens exceeds 120 minutes, and when using structural fire protection – 240 minutes. The possibility of recalculation (including reduction) of fire protection thicknesses used in the test is shown. This is substantiated by thermal engineering calculations, for which it is provided to obtain new data on the thermophysical characteristics of fire protection materials in the operating temperature range.

Conclusions. The methodology of complex researches is proposed, a considerable volume of unique fire and other experiments with thermotechnical analysis of their results is carried out. A considerable amount of important information necessary to prevent explosive failure and ensure the specified fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures was obtained. Recommendations for further experimental and theoretical studies are presented. The use of the obtained results in the design of reinforced concrete structures, means of their fire protection, as well as in the adjustment of normative documents on reinforced concrete structures are presented.

Keywords: structural fire protection; fire resistance limit; standard mode of exposure; hydrocarbon mode of exposure; thermotechnical calculations; static load; thermophysical characteristics

For citation: Antonov S.P., Garashchenko A.N., Golovanov V.I., Novikov N.S. Prediction of fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfibre or fire protection. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):56-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.56-68 (rus).

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

Введение

В настоящее время в Российской Федерации интенсивно ведется строительство ответственных сооружений, к которым относятся автодорожные и прочие тоннели и различные тоннельные сооружения, подземные паркинги, высотные здания, эстакады и т.д. При строительстве должны применяться железобетонные конструкции (ЖБК) с задаваемыми параметрами огнестойкости. Кроме этого, для таких конструкций необходимо обеспечить возможность сохранения (восстановления) уровня их огнестойкости после огневого воздействия (или даже ее уве-

личения) за минимальное время и с наименьшими затратами. Рациональное решение задач обеспечения огнестойкости ЖБК невозможно без проведения целого комплекса работ, которые целесообразно проводить по определенной методологии, предусматривающей в обязательном порядке как экспериментальные, так и теоретические исследования.

При строительстве указанных сооружений используются, как правило, высокопрочные (тяжелые) бетоны класса от В25 и выше, а эксплуатация часто осуществляется в условиях повышенной влажности. Изучение последствий огневого воздействия при пожарах, про-

водящееся за рубежом¹ [1–8] и в нашей стране [9–13], явно свидетельствует о том, что во многих случаях происходит снижение огнестойкости несущих ЖБК по причине взрывообразной потери целостности бетона (ВПЦ) или другими словами хрупкого (взрывообразного) разрушения слоя бетона (иногда до 50 мм¹ [8, 12]) с оголением арматурного каркаса конструкций.

Большинство исследователей придерживаются мнения, что на вероятность ВПЦ влияет целый ряд факторов. В их числе повышенная влажность, уровень действующих напряжений и деформаций, режим огневого воздействия, уровень нагрева бетона, рецептура бетона. Имеется понимание, что повышенная влажность в значительной степени способствует возрастанию до критического уровня внутренних напряжений в ЖБК в условиях огневого воздействия на них [8, 10–12]. В связи с этим в качестве средства защиты бетонов от ВПЦ за рубежом [3–8, 14–17], а в последнее время и в нашей стране [9–13, 18] практикуется использование полипропиленовой микрофибры (ППМФ). Ее введение в матрицу бетона обеспечивает увеличение пористости за счет формирования микроканалов в прогретых слоях бетона, что позволяет избежать роста давления в порах до критического уровня. Этим снижается вероятность взрывообразной потери целостности (ВПЦ) конструкций из тяжелых бетонов. В связи с этим использование ПМФ рекомендовано не только зарубежными, но и, наконец, отечественными нормативами². Налицо также преимущества при изготовлении новых железобетонных конструкций ЖБК по такой технологии, что подтверждается зарубежными¹ [3, 4, 8, 14–17] и отечественными публикациями [10–13, 18].

Другим и очевидным способом снижения вероятности ВПЦ, повышения огнестойкости и огнестойкости ЖБК является использование средств огнезащиты¹ [3, 4, 8, 12–21]. Использование вспучивающихся покрытий [19, 20] представляется наименее эффективным по сравнению с конструктивной огнезащитой в виде плит и штукатурок. Это связано с неспособностью ВОЗП обеспечивать стойкость пенококса в течение длительного огневого воздействия и за счет этого обеспечивать высокие пределы огнестойкости конструкций, а также из-за недоказанной адгезии таких покрытий к бетону при нагреве.

Понятно, что для нанесения (монтажа) конструктивной огнезащиты требуются значительные затраты времени и средств. Тем не менее, безус-

ловно, возможны ситуации, когда ее применение необходимо, но только в случае, если это подкрепляется объективными данными. В отчете¹ содержатся рекомендации о том, что огнезащита должна обеспечить снижение уровня нагрева до 380 °С на поверхности ЖБК и до 550 °С на стальной арматуре. Для некоторых объектов и марок бетонов, склонных к выкрашиванию, для обеспечения огнестойкости конструкций после пожара рекомендуется даже снижение до 180–220 °С на их поверхности.

Наряду с наличием публикаций о преимуществах применения конструктивной огнезащиты, имеющих рекламный характер, следует отметить принципиальную возможность того, что полипропиленовая микрофибра не во всех случаях исключает ВПЦ бетонов¹ [8]. Особенно это касается поведения ЖБК при запредельных режимах огневого воздействия газовой среды с температурой до 1200–1350 °С. Это тоннельные кривые RWS и HCinc, которые в нашей стране пока не регламентируются. В таких случаях задачу повышения огнестойкости ЖБК целесообразно решать с помощью конструктивной огнезащиты, но с доказательством ее эффективности в рассматриваемых условиях. Для этого необходимы соответствующие исследования ЖБК с огнезащитой и объективный анализ их результатов.

Можно отметить, что исследование эффективности и характеристик материалов конструктивной огнезащиты представляет несомненный научный и практический интерес не только для конструкций из железобетона. В нашем же случае они позволяют получить объективную информацию для сопоставительного технико-экономического анализа возможных вариантов и выбора наиболее рационального способа обеспечения требуемой огнестойкости ЖБК.

Как отмечалось, и у нас, и за рубежом отсутствуют обоснованные сомнения в том, что вероятность взрывообразного разрушения и в целом огнестойкость и огнестойкость железобетонных конструкций зависят от уровня действующих напряжений и деформаций. Поэтому в российском (как и в зарубежном) законодательстве предусмотрено обязательное определение уровня огнестойкости несущих строительных конструкций при действии статических эксплуатационных нагрузок. Однако до настоящего времени в нашей стране объем таких огневых экспериментов для ЖБК был явно недостаточен, несмотря на то что получение подобной информации чрезвычайно востребовано. Кроме того, в большинстве случаев не проводился на должном уровне анализ и обобщение результатов даже проведенных экспериментов, хотя он необходим для их обоснованного использования при проектировании зданий и сооружений на этапе строительства

¹ Structural Fire Protection For Road Tunnels. ITA REPORT n.18 // The International Tunnelling and Underground Space Association. ITA Working Group 6, April 2017. Longrine, Avignon. France. 46 p. URL: www.longrine.fr

² СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнестойкости. п. 9.16.

или реконструкции. Для проведения такого анализа и последующего проектирования конструкций необходимо в большей мере применять предусмотренные нормативными документами расчетно-аналитические методы оценки их огнестойкости. Требуется выбор надежных методик расчетов, а также определение (уточнение) характеристик материалов, необходимых для их проведения. Это прочностные характеристики для статических расчетов огнестойкости и теплофизические характеристики (ТФХ) для теплотехнических.

Было установлено, что такая неармирующая добавка, как ППМФ, естественно, может понизить прочностные свойства бетона [10–13]. Для новых рецептур бетонов с полипропиленовой микрофиброй их определение актуально, тем более, если такие характеристики будут получены и при повышенных температурах. Но следует отметить, что информация о прочностных характеристиках недостаточна даже для существующих марок бетонов (без ППМФ). В нашем случае их определение необходимо, в том числе, для подтверждения эффективности проводимых мероприятий по подбору композиции бетонной матрицы для компенсации возможного падения прочности бетонов при добавлении в их состав полипропиленовой микрофибры.

Сложность и важность всех аспектов обозначенной проблемы обусловила, как отмечено в [21], необходимость проведения целого комплекса исследований по схеме «материал – технология – экспериментальные исследования свойств материалов и огнестойкости конструкций – прогностическое моделирование с помощью расчетно-аналитических методов – внедрение результатов при проектировании конструкций и подготовке нормативных документов по ЖБК». Получение новой информации по каждой из указанных позиций актуально для ЖБК. Но, прежде всего, очевидна необходимость проведения значительного объема предусмотренных нормативными документами огневых экспериментов при действии силовых нагрузок, а также теплотехнического анализа и обобщения его результатов с использованием расчетно-аналитических методов оценки огнестойкости конструкций. Для проектирования ЖБК с требуемой огнестойкостью и обеспечения (в случае необходимости) их огнезащиты требуется информация по прочностным и теплофизическим характеристикам применяемых материалов.

Анализ используемых в настоящее время расчетно-аналитических методов свидетельствует о том, что методики статических расчетов имеются и широко используются. В то же время отсутствуют общепринятые методики теплотехнических расчетов для моделирования температурных полей,

выбора рациональных систем и определения толщин огнезащиты, обеспечивающих заданные пределы огнестойкости конструкций. В результате во многих случаях толщины огнезащиты назначаются без должного обоснования. Применяются устаревшие и недостаточно апробированные теплотехнические методики (см., например, [22, 23]), при этом не приводятся ТФХ материалов, при которых расчеты проводились. В то же время имеются методики теплотехнических расчетов конструкций с огнезащитой, которые уже успешно используются и могут рассматриваться в качестве основы для дальнейшего совершенствования. Они являются важным элементом применяемой методологии комплексных исследований. Также следует отметить недостаточный уровень исследованности физико-механических и теплофизических характеристик материалов (тяжелых бетонов и средств огнезащиты). Обозначенная и применяемая методология предполагает определение или уточнение таких характеристик.

Таким образом, целью исследований является выбор эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости ЖБК. Для этого потребовалось проведение значительного количества огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой при наличии и отсутствии полипропиленовой микрофибры в составе бетона, а также при использовании конструктивной огнезащиты. Это позволяет проводить объективный анализ полученных результатов и обосновывать варианты их практического использования. Предназначением результатов комплексных исследований является их внедрение при проектировании, испытаниях и изготовлении конструкций на строительных объектах. Естественно, одним из важных конечных результатов должны стать обоснованные рекомендации по корректировке соответствующих нормативных документов, в частности².

Материалы и методы

Объектом экспериментальных исследований являлись конструкции из тяжелых (высокопрочных) бетонов класса от В25 до В40 с использованием полипропиленовой микрофибры или средств огнезащиты. Они уже применяются и имеют хорошие перспективы для дальнейшего использования при строительстве ответственных объектов. Целью исследований является определение их требуемой огнестойкости и наиболее рациональных вариантов ее обеспечения.

Была обоснована целесообразность применения и параметры полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS» [11]. Она вводится в количестве 1 кг/м³ в состав рецептуры бетонов. Была отработана

и реализуется технология изготовления железобетонных изделий с микрофиброй (несущих колонн, плит перекрытий, тубингов обделки тоннелей) и определен значительный объем характеристик бетонов с ППМФ [10, 11, 13, 18]. Поскольку даже небольшое количество микрофибры приводит все-таки к незначительному снижению прочностных свойств на сжатие бетонов по отношению в тому же составу бетонов, но без ППМФ, были предложены и использованы компенсирующие добавки (различные суперпластификаторы), позволившие нивелировать такое снижение и получить проектный класс бетона. Исследовались образцы ЖБК (колонны и плиты перекрытий), изготовленные из тяжелых бетонов класса от В25 до В40 с ПМФ и без нее. На части образцов без ПМФ для предотвращения ВЦП и повышения их огнестойкости наносилась (монтировалась) конструктивная огнезащита. Огнестойкость ЖБК определялась установленными методами, т.е. при действии различных нагрузок по ГОСТ 30247.1–94³.

В качестве основного варианта конструктивной огнезащиты рассматривались плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» («ПФ»), которые уже доказали свою эффективность и представляются перспективным средством защиты от пожаров различных строительных конструкций. В ходе подготовки железобетонных изделий с этими плитами для проведения огневых экспериментов под нагрузкой использовались штатные элементы крепления плит. Учитывалось, что именно с ними должна оцениваться работоспособность и эффективность конструктивной огнезащиты, а также огнестойкость защищаемых ею конструкций. Дополнительно рассматривался вариант конструктивной огнезащиты в виде цементной огнезащитной штукатурки «Игнис Лайт» («ИЛ»). Получение информации по экспериментам с огнезащитой, кроме прочего, представляет интерес для сопоставительного технико-экономического анализа, который необходим для выбора наиболее целесообразного варианта для исключения ВЦП и повышения огнестойкости ЖБК.

Огнестойкость является важнейшей характеристикой, необходимой для обоснования возможности использования ЖБК на ответственных объектах. Как отмечалось, для ее определения прежде всего необходимо проведение требуемого объема огневых экспериментов под нагрузкой. Это реализуется в ходе проводимых авторами комплексных исследований. При этом был обеспечен больший, чем того требуют существующие методики, объем термодинамических измерений, а также уточнена система силового нагружения конструкций, что позволяло лучше вос-

производить действие задаваемых эксплуатационных нагрузок. В ходе проведенных авторами ранее огневых испытаний различных образцов ЖБК уже была показана эффективность использования ППМФ. Но в данной статье предлагается обратить внимание на две серии огневых экспериментов, которые удалось организовать и провести в последнее время.

Во-первых, это серия из одиннадцати испытаний под нагрузкой несущих железобетонных колонн и плит перекрытий при отсутствии и наличии ППМФ в составе бетона, а также при отсутствии и наличии огнезащиты. Реализовывался стандартный температурный режим воздействия. Испытывались образцы железобетонных колонн сечения 400×400 мм при вертикальной статической нагрузке 981 кН, а также плит толщиной 170 и 140 мм при различных нагрузках. Вторая серия состояла из пяти испытаний железобетонных плит при различных нагрузках. Главной ее отличительной особенностью являлось то, что она проводилась при углеводородном режиме огневого воздействия.

Что касается первой серии испытаний, то описание, особенности методики проведения и результаты испытаний образцов железобетонных колонн и плит представлены в статье [12]. В ней отражен порядок измерений температуры с помощью термопар, установленных по толщине ЖБК и под огнезащитой, а также порядок анализа состояния образцов в ходе и после экспериментов. Для наглядности основные сведения об этих испытаниях обобщены и представлены в табл. 1 и 2 (позиции 1–6). Кроме того, упомянут эксперимент, проведенный для ненагруженных плит при углеводородном режиме воздействия (см. табл. 2, позиция 7).

Во второй (последней) серии из пяти огневых экспериментов под нагрузкой испытывались образцы плит из железобетона класса В40, но уже при тепловом воздействии по ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014⁴ (углеводородный температурный режим). Образцы представляли собой железобетонные плиты размером $600 \times 1200 \times 150$ мм. Глубина залегания арматуры 33 мм (до середины арматурного прутка). Основные сведения об особенностях проведения второй серии испытаний образцов плит представлены в табл. 2 (позиции 8–12).

В двух экспериментах использовались образцы без микрофибры (позиции 8 и 9), а в образец для одного из экспериментов (позиция 10) в состав бетона добавлялась полипропиленовая микрофибра в указанном ранее количестве (1 кг/м^3). Определено, что прочность бетона без микрофибры составляла 44,3 МПа, а с ПМФ — 46,0 МПа.

³ ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.

⁴ ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. П. 4.

Оценивалось также влияние на огнестойкость образцов без ППМФ, но с конструктивной огнезащитой, состоящей в одном случае из двух слоев плит «ПРОЗАСК Файерпанель» по 12,5 мм (общая толщина 25 мм), а в другом случае — из одного слоя этих плит толщиной 12,5 мм (позиции 11 и 12). Крепление плит к образцам осуществлялось при помощи саморезов по бетону, т.е. оценивалась также эффективность данного способа крепежа плит. Испытания проводились с фиксированием времени достижения образцами предельного состояния, т.е. деформаций плит до предельного уровня (150 мм) при конкретных тепловых и силовых нагрузках. Дополнительно измерялась температура арматуры, с глубиной ее залегания (до оси), равной 33 мм. Анализировались состояние и внешний вид образцов в ходе проведения и после экспериментов.

Авторами неоднократно отмечалось, что наряду с недостаточным количеством огневых экспериментов при действии нагрузок недостаточное внимание уделяется использованию статических и теплотехнических расчетно-аналитических методик для анализа, обработки и правильной трактовки дорогостоящих экспериментальных результатов.

Что касается методик для проведения статического анализа результатов огневых экспериментов, а также статических расчетов огнестойкости, то они имеются и используются на практике. Им до настоящего времени уделялось намного больше внимания, чем теплотехническим. Основной проблемой статических расчетов является недостаточная исследованность прочностных характеристик различных классов бетонов при высоких температурах. Поэтому получение любой дополнительной информации по таким характеристикам является важной и востребованной. В рамках проводимых авторами комплексных исследований предусмотрено определение пределов прочности на сжатие и коэффициентов условий работы для нескольких классов тяжелых бетонов при наличии и отсутствии микрофибры, причем с учетом влияния температуры на эти характеристики. Информация по методике и результатам этих исследований будет представлена в последующих публикациях.

Расчеты огнестойкости должны учитывать результаты теплотехнических расчетов температурных полей в ЖБК при огневом воздействии на них по заданному режиму. Но, как показала практика, во многих случаях оценки огнестойкости ЖБК могут проводиться на основании только теплотехнических (даже без проведения статических) расчетов. Такие возможности показаны в [12], где обоснован выбор и продемонстрирована эффективность использования надежных и относительно несложных методик и программ теплотехнических расче-

тов, применимых как при расчетах температурных полей, так и для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов и оценок огнестойкости ЖБК с огнезащитой и без нее.

Для конструкций из ЖБК с огнезащитой можно использовать методику, представленную, например, в [24]. Практика показала, что она вполне применима даже для конструкций из материалов с содержанием влаги, к которым относится и железобетон, и основные материалы конструктивной огнезащиты. Это одномерная задача, но практика показала возможность ее использования во многих случаях и для различных конструкций. Методика и программа основаны на численном решении методом конечных разностей общеизвестной системы уравнений, включающей уравнение нестационарной теплопроводности многослойной пластины (или цилиндра), причем пока даже без учета сложных процессов дегидратации, тепломассопереноса и пр., происходящих в огнезащите при нагреве [12, 24]. Имеется и подобная двумерная конечно-разностная методика и программа.

Для расчетов необходимы данные по теплофизическим характеристикам бетонов, а также средств огнезащиты (в случае ее применения), причем в рабочем диапазоне температур. При расчетах температурных полей в ЖБК на данном этапе исследований признано целесообразным пользоваться опубликованными данными по ТФХ для тяжелых бетонов [25]. В то же время уделено внимание исследованиям ТФХ материалов конструктивной огнезащиты.

Их определение является одним из элементов упоминаемой методологии комплексных исследований, причем признано целесообразным проведение дополнительных испытаний образцов огнезащиты на стенде лучистого нагрева [26]. Проводились термпарные измерения, обработка которых (кроме важных данных по огнезащитной эффективности) позволила определить ТФХ, причем в рабочем диапазоне температур. В [26, 27] показано, что испытания по такой методике представляются наиболее приемлемым вариантом дополнительных исследований конструктивной огнезащиты. Тем более что обеспечивалось воспроизведение в течение продолжительного времени режимов как стандартного, так и углеводородного воздействия.

Однако основное внимание должно уделяться подготовке, проведению и анализу результатов испытаний под нагрузкой различных ЖБК с целью определения их огнестойкости установленными методами.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты двух уникальных серий подготовленных и проведенных соответствующим образом огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит убедительно продемонстрировали эффектив-

ность использования ПМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнестойкости.

Эти результаты уже сейчас можно непосредственно использовать для обоснования оптимальных технических решений по обеспечению огнестойкости ЖБК, в том числе решений по их рациональной огнезащите. Кроме того, они могут являться основой для обоснованного «переноса» результатов на другие условия и конструкции, «аналогичные», но несколько отличающиеся от испытанных. Следует напомнить, что возможность такого «переноса» с использованием надежных расчетно-аналитических методик предусмотрена нормативными документами.

В таблицах указаны значения температуры, зафиксированные в моменты окончания испытаний с помощью дополнительных термодатчиков, установленных на различной глубине образцов ЖБК, а также на их поверхности (под огнезащитой). Такие температурные измерения использовались авторами при теплотехническом анализе, обработке и обобщении результатов первой из рассматриваемых серий испытаний образцов ЖБК [12]. Авторы глубоко убеждены в целесообразности или даже обязательности таких измерений. Можно отметить, что рекомендации по подобным измерениям при огневых экспериментах приводятся и в зарубежных публикациях¹. Основные результаты обеих серий проведенных авторами огневых экспериментов, включая некоторые сведения об измерениях, обобщены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, за время испытаний предельное состояние образцов колонн при указанных нагрузках и стандартном температурном режиме не наступило как в случае использования ПМФ, так и конструктивной огнезащиты. Таким образом было предотвращено взрывообразное разрушение и обеспечены достаточно высокие пределы огнестойкости колонн. Это означает, что возможно изменение подхода к проектированию ЖБК, в частности, за счет уменьшения толщины защитного слоя бетона и, соответственно, веса конструкций. Например, толщины огнезащиты (порядка 25 мм), указанные в табл. 1, для многих реальных ситуаций представляются чрезмерными, поскольку требуемая огнестойкость в ходе испытаний была обеспечена со значительным запасом. При необходимости толщины огнезащиты могут быть уменьшены, но только при соответствующем обосновании с использованием расчетных методик.

При испытаниях плит при нагрузках и стандартном температурном режиме предельное состояние (разрушение) зафиксировано только для образцов без ПМФ (см. табл. 2 позиция 1), причем уже после относительно непродолжительного огневого воздействия (53 мин). Использование конструктивной огнезащиты и ПМФ позволило предотвратить ВПЦ и обеспечить высокие пределы огнестойкости колонн и плит, причем со значительным запасом. Это позволяет, в частности, обосновать возможность уменьшения указанных в таблице толщин огнезащиты. Как показано в [12], подобные обоснования должны основываться на теплотехническом

Таблица 1. Основные результаты огневых испытаний железобетонных колонн при стандартном режиме воздействия
Table 1. Main results of reinforced concrete columns fire tests with standard exposure conditions

Номер Number	Класс бетона (наличие ПМФ) Concrete class (PPMF availability)	Время, мин/соответствие показателю Time, min/compliance with indicator	Предельная/фиксируемая деформация, мм Maximum/fixed deformation, mm	Максимальная температура (на глубине), мм Maximum temperature (at depth), mm	Особенности испытаний и результат Test features and result
1	B30 (–)	15/R15	30/5,2	89 °C (20) 52 °C (40)	ВПЦ (от 5 до 50 мм) Integrity loss (from 5 till 50 mm)
2	B30 (+)	15/R15	30/3	53 °C (20) 42 °C (40)	Без ВПЦ Without integrity loss
3	B30 (+)	151/R150	30/4	300 °C (20) 165 °C (30) 150 °C (50)	Без ВПЦ Without integrity loss
4	B30 (–)	241/R240	30/4,7	627 °C (20)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
5	B30 (–)	151/R240	30/8,1	400 °C (20) 276 °C (30)	Без ВПЦ/«ИЛ» — 26 мм Without integrity loss/“IL” — 26 mm

Примечание: наличие (+) и отсутствие (–) ПМФ; ПФ — плиты «ПРОЗАСК Файерпанель»; ИЛ — штукатурка «Игнис Лайт».
Note: presence (+) and absence (–) of PPMF; PF — slabs “PROZASK Firepanel”; IL — plaster “IGNIS Light”.

Таблица 2. Основные результаты огневых испытаний железобетонных плит при стандартном (СТ) и углеводородном (УВ) режиме воздействия**Table 2.** Main results of reinforced concrete slabs fire tests with standard (ST) and hydrocarbon (HC) exposure conditions

Номер Number	Класс бетона/ толщина плиты, мм Concrete class/slab thickness, mm	Нагрузка Load	Режим и время воздействия (разрушения*), мин/показатель Mode and time of exposure (deformation*), min/indicator	Предельная/ фиксируемая деформация, мм Maximum/fixed deformation, mm	Максимальная температура (на глубине, мм) Maximum temperature (at depth, mm)	Особенности испытаний и результат Test features and results
1	B25/170	40 кН 40kN	СТ – 53 (53*)/ REI 45	140/140	501 °C (30)	ВПЦ до 7 мм (17–25 мин) Integrity loss till 7 mm (17–25 min)
2	B25/170	600 кг 600 kg	СТ – 121/ REI 120	140/121	292 °C (25)	Без ВПЦ/«ПФ» 12,5 мм Without integrity loss/“PF” 12.5 mm
3	B25/170	600 кг 600 kg	СТ – 121/ REI 120	140/9,5	355 °C (0) 330 °C (20)	Без ВПЦ «ИЛ» — 25 мм Without integrity loss “IL” — 25 mm
4	B30/140	24,5 кН 24.5 kN	СТ – 91/ REI 90	285/7	295 °C (0)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
5	B30/140	24,5 кН 24.5 kN	СТ – 185/ REI 180	285/259	348 °C (0) 126 °C (50) 118 °C (80)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
6	B45/140	566 кг/м ² 566 kg/m ²	СТ – 180/ REI 180	200/184	677 °C (33)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
7	B25/170	—	УВ – 139	—	312 °C (20) 108 °C (30)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
8	B40/150	900 кг 900 kg	УВ – 139 (139*)	150/150	498 °C (33)	ВПЦ до 14 мм Integrity loss till 14 mm
9	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 108 (108*)	150/150	431 °C (33)	ВПЦ до 20 мм Integrity loss till 20 mm
10	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 139 (139*)	150/150	679 °C (33)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
11	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 311 (311*)	150/150	551 °C (33)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
12	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 258 (258*)	150/150	581 °C (33)	Без ВПЦ «ПФ» — 12,5 мм Without integrity loss “PF” — 12.5 mm

* Время достижения образцами предельного уровня деформаций / Time for specimens to reach maximum deformation

анализе, качество которого возрастает при использовании надежной информации по дополнительным измерениям в ходе огневых экспериментов.

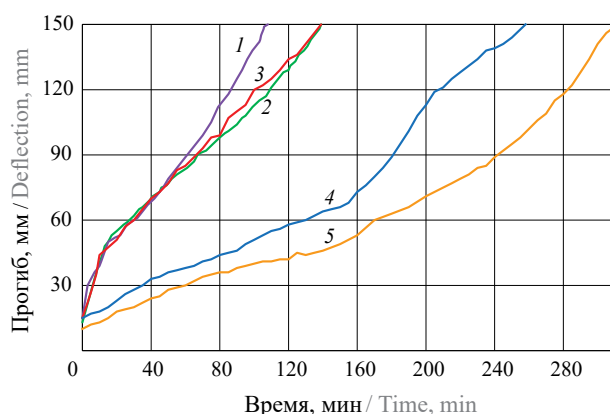
Все пять впервые проведенных испытаний железобетонных плит под нагрузкой при углеводородном температурном режиме продолжались до момента разрушения образцов. Получены результаты, свидетельствующие о значительном увеличении времени наступления предельного состояния (см. табл. 2) при использовании как ПМФ, так и огнезащиты одним или двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Зафиксировано, что при наличии огнезащиты температура необогреваемой поверхности плит на момент разрушения превысила критическое значение и возросла до 258 °С при толщине 12,5 мм и до 311 °С при толщине 25 мм. При необходимости возможен теплотехнический анализ с «переносом» полученных результатов на «аналогичные» конструкции и другие условия высокотемпературного воздействия с использованием полученных результатов как «штатных», так и дополнительных температурных измерений.

В ходе испытаний образцов без микрофибры и без огнезащиты фиксировались характерные хлопки, свидетельствовавшие о взрывообразном разрушении бетона. Осмотр образцов после этих экспериментов подтвердил наличие утонений защитного слоя бетона на отдельных участках, что подтверждает ВПЦ конструкций, причем большие участки и утонения зафиксированы при большем уровне нагрузок. Возможен и полезен также последующий статический анализ этих испытаний. Для него востребованной информацией являются результаты измерений величины прогиба плит. Соответствующие кривые для рассматриваемых пяти экспериментов представлены на рисунке.

Как отмечалось, основной проблемой статических расчетов огнестойкости является недостаточная исследованность прочностных характеристики бетонов, в особенности при высоких температурах.

Возможности теплотехнического анализа авторами показаны в [12, 24], здесь обоснован выбор и продемонстрирована эффективность использования надежных и относительно несложных конечно-разностных методик и программ расчетов, применимых как для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов, так и для расчетов температурных полей и оценок огнестойкости ЖБК с огнезащитой и без нее.

Для проведения более качественного анализа авторами предложен и реализован порядок определения теплофизических характеристик огнезащиты в рабочем диапазоне температур. Он изложен в [26], а также в [27], где на примере огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» представлены



Изменение во времени величины прогиба плит при испытаниях под нагрузкой и углеводородном температурном режиме: кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют позициям 8, 9, 10, 11, 12 табл. 2

Time changes in the slab deflection value under load and hydrocarbon temperature tests: curves 1, 2, 3, 4 and 5 correspond to positions 8, 9, 10, 11, 12 of the Table 2

результаты исследования их ТФХ как на известных лабораторных установках, так и с использованием стенда лучистого нагрева, где воспроизводился стандартный и углеводородный режимы воздействия, с последующей обработкой результатов термпарных измерений при решении обратной задачи теплопроводности. Подобный подход позволил определить ТФХ плит в рабочем диапазоне температур, причем он применим для исследований любых других средств конструктивной огнезащиты [26].

Таким образом, представлены основные положения применяемой авторами методологии комплексных исследований по одной из важных проблем пожарной безопасности и результаты работ по ее реализации. Они необходимы для принятия обоснованных технических и нормативных решений по ЖБК, что отвечает реальным потребностям строительной отрасли.

Выводы

1. Обоснована целесообразность решения актуальной задачи обеспечения требуемой огнестойкости железобетонных конструкций для ответственных строительных объектов в соответствии с предложенной методологией комплексных исследований, реализация которой уже позволила получить целый ряд результатов, представляющих как научный, так и практический интерес.

2. Представлены и обобщены результаты двух уникальных серий подготовленных и проведенных соответствующим образом огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит под нагрузкой, которые продемонстрировали эффективность использования ПМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнесохранности при воздей-

ствии как стандартного, так и углеводородного режимов воздействия.

3. Отмечена необходимость проведения теплотехнического анализа результатов огневых экспериментов, позволяющего осуществлять обоснованный «перенос» результатов на другие условия и конструкции, которые можно признать как «аналогичные», но отличающиеся от испытанных.

4. Пр продемонстрирована роль и особенности использования конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» как перспективного средства для предотвращения ВПЦ и обеспечения высоких пределов огнестойкости железобетонных конструкций.

5. Отмечено, что одним из элементов реализуемой методологии комплексных исследований являются испытания на стенде лучистого нагрева образцов конструктивной огнезащиты, позволяющие проводить температурные измерения, дающие информацию по ее эффективности и позволяющие

при их обработке получать данные по ТФХ огнезащитных материалов в рабочем диапазоне температур.

6. Показано, что уже полученные и последующие результаты исследований огнестойкости железобетонных изделий, а также эффективности и характеристик конструктивной огнезащиты являются основой для проведения технико-экономического анализа с выбором наиболее целесообразного способа предотвращения ВЦП и обеспечения требуемых показателей ЖБК.

7. Предполагается использовать практический опыт, накопленный в ходе разработки технологий, проведения теплотехнического анализа результатов огневых экспериментов и моделирования прогрева, проектирования и изготовления конструкций, при подготовке рекомендаций по корректировке нормативных документов по ЖБК, в частности по внесению изменений в СП 468.1325800.2019².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *McNamee R.J., Bostrom L.* Fire spalling-the moisture effect // 1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure-From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3–5, 2009. Pp. 120–129.
2. *Jansson R.* Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology. Stockholm : Trita-BKN, Bulletin, 2013. 117 p.
3. *Maraveas C., Vrakas A.A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // Structural Engineering International. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
4. *Annerel E., Boch K., Lemaire T.* Passive fire protection end life safety // Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. “SEE Tunnel: Promoting in SEE Region” ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
5. *Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M.* High speed railway Milan – Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining // Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions. Bergen, Norway, Bergen, 2017. Pp. 1–10.
6. *Dehn F., Werther N., Knitl J.* Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Issue 8. Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
7. *Liu J.-C., Tan K.H., Yao Y.* A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 184. Pp. 581–590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
8. *Hendrix B., Pimienta P.* The future for fire protection // Tunnelling Journal. September, 2019. Pp. 8–12. URL: www.researchgate.net/publication/287431544_Fire_behaviour_of_high_performance_concrete_-_An_experimental_investigation_on_spalling_risk
9. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В.* Огнестойкость железобетонных туннелей подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.1818322/PVB.2019.28.05.60-70
10. *Новиков Н.С.* Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 167 с.
11. *Антонов С.П.* Технологии предотвращения взрывообразного разрушения бетонов при огневом воздействии // Пожарная безопасность. Специализированный каталог. 2021. С. 56–61.
12. *Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С.* Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 45–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64

13. Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасова И.П., Востров М.С. Полипропиленовая фибра — эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 15–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms and concrete // Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. Issue 2. Pp. 125–136. DOI: 10.1680/mac.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria // Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. Issue 3. Pp. 189–204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17. Issue 2. Pp. 259–264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 302–309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
18. Пухаренко Ю.В., Кострикин М.П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию // Строительные материалы и технологии. 2020. № 2 (88). С. 96–106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106
19. Ройтман В.М., Габдулин Р.Ш. Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 2. С. 11–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22413522>
20. Габдулин Р.Ш. Повышение огнестойкости железобетонных конструкций с помощью тонкослойных огнезащитных покрытий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 146 с.
21. Антонов С.П., Гаращенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Результаты определения огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй // Огнезащита материалов и конструкций SPBPU FPM-2023 : сб. тез. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2023 г. СПб. : Университет ГПС МЧС. С. 23–26.
22. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файрборд // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
23. Пронин Д.Г., Тимонин С.А., Голованов В.И. СТО АРСС 11251254.001-018–03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных облицовок. М. : АРСС, 2018. 70 с.
24. Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В. Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39
25. Волков А.А., Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Федоров В.Ю. Влияние влажности строительных материалов на точность расчетов прогрева конструкций при оценке их огнестойкости // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, в рамках VI Междунар. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 207–212.
26. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольченко А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огнетеплозащиты и огнестойкости конструкций и изделий в условиях высокотемпературного воздействия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97
27. Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 13–29. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29

REFERENCES

1. McNamee R.J., Bostrom L. Fire spalling-the moisture effect. *1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure-From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling*. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3–5, 2009; 120-129.
2. Jansson R. *Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology*. Stockholm, Trita-BKN, Bulletin, 2013; 117.
3. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
4. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly*. Dubrovnik, Croatia. 2015; 1-10.

5. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan – Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions*. Bergen, Norway. 2017; 1-10.
6. Dehn F., Werther N., Knil J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton-und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-635. DOI: 10.1002/best200608186
7. Liu J.-C., Tan K.H., Yao Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 184:581-590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
8. Hendrix Bart, Pimienta Pierre. The future for fire protection. *Tunnelling Journal*. September, 2019; 8-12. URL: www.researchgate.net/publication/287431544_Fire_behaviour_of_high_performance_concrete_-_An_experimental_investigation_on_spalling_risk
9. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.1818322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
10. Novikov N.S. *Fire resistance of fiber concrete constructions for auto roads tunnels and underground : dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2019; 167 (rus).
11. Antonov S.P. Technologies of concrete spalling preventing under fire action. *Fire Safety. Special Catalog*. 2021; 56-61 (rus).
12. Garashchenko A.N., Antonov S.P., Danilov A.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):45-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64 (rus).
13. Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P., Savrasov I.P., Vostrov M.S. Polypropylene fiber is an effective way to struggle with the explosion-like destruction of concrete in case of fire. *Building materials*. 2018; 11:15-20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20 (rus).
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(2):125-136. DOI: 10.1680/mac.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(3):18-204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011; 17(2):259-264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:302-309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
18. Pukharensko Yu.V., Kostrikin M.P. Resistance of fiber-reinforced concrete to high-temperatures. *Building and reconstruction*. 2020; 2(88):96-106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106 (rus).
19. Rojzman V.M., Gabdulin R.Sh. Ensuring of the reinforced concrete constructions durability against spalling under fire by thin layer intumescent fire retardant coating. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2013; 2:11-16.
20. Gabdulin R.Sh. *Ensuring of the fire resistance concrete constructions durability against spalling by thin layer fire retardant coating : dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2014; 146. (rus).
21. Antonov S.P., Garashchenko A.N., Golovanov V.I., Novikov N.S. The results of determining the fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfiber. *Fire protection of materials and structures SPBP U FPM-2023 : collection of abstracts of the I Inter. scientific and practical conference. St. Petersburg, April 18-20, 2023*. Saint Petersburg, University of GPS of the Ministry of Emergency Situations, 2003; 23-26. (rus).
22. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-fireboard plates. *Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).
23. Pronin D.G., Timonin S.A., Golovanov V.I. STO ARSS 11251254.001-018-03. *Design of fire protecting loaded steel constructions using different facings*. Moscow, ARSS Publ., 2018; 70. (rus).
24. Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P., Marchenkova S.V., Pavlov V.V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and preset fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):21-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39 (rus).
25. Volkov A.F., Rojzman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.U. Influence of building materials humidity on heating calculation accuracy at fire protecting grade. *Systemotechnique of building. Cyberphysique building systems, VI scientific conference. Moscow, November 14-16, 2018*. Moscow, MGSU, 2018; 207-212. (rus).
26. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Kobylkov N.V., Nikolchenkin A.A., Antipov E.A. Experimental and computational modeling of fire and thermal protection composite materials under high-temperature exposure. *Aviation materials and technologies*. 2022; 3(68):08. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97 (rus).

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

Поступила 27.10.2023, после доработки 03.11.2023;

принята к публикации 08.11.2023

Received October 27, 2023; Received in revised form November 3, 2023;

Accepted November 8, 2023

Информация об авторах

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

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

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

НОВИКОВ Николай Сергеевич, научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 942702; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Вклад авторов:

Антонов С.П. — концепция исследования; организация и участие в проведении огневых экспериментов; анализ экспериментальной информации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Гаращенко А.Н. — концепция исследования; научное руководство; участие в анализе экспериментальной информации; анализ результатов расчетов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Голованов В.И. — участие в разработке концепции исследования, анализе экспериментальной информации и доработке текста.

Новиков Н.С. — участие в разработке концепции исследования, обеспечении и проведении огневых экспериментов, анализе экспериментальной информации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

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

Vladimir I. GOLOVANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Nikolay S. NOVIKOV, Resercher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Contribution of the authors:

Sergey P. Antonov — conceptual research; organization and participation in various firing experiments; analysis of experimental information; describing the initial; final conclusions.

Anatoliy N. Garashchenko — conceptual research; scientific guidance; participation in the analysis of experimental information; analyzing the results of text calculations; describing the initial, final results of the survey.

Vladimir I. Golovanov — participation in the conceptual research, in the analysis of experimental information and describing the initial.

Nikolay S. Novikov — participation in the conceptual research, in the support and preparation conceptual research and in the analysis of experimental information.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 69–78
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):69-78

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78>

Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях

Антон Дмитриевич Корольченко ✉, Николай Викторович Громов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность настоящей публикации обусловлена тем, что при разработке конструктивных решений предохранительных запорных устройств (ПЗУ) проектировщики часто используют элементы и материалы, которые принципиально не применимы для этих целей. Проанализированы особенности предохранительных конструкций (ПК) и легкосбрасываемых конструкций (ЛСК), используемых в зданиях и помещениях, где возможен внутренний аварийный взрыв. Приведены результаты экспериментальных исследований по тестированию работоспособности реальных конструкций.

Цель. Определение возможности применения ПК и ЛСК на взрывоопасных объектах, а также ограничений на их крепежные элементы и используемые материалы.

Материалы и методы. Исследования ЛСК, фиксируемых ПЗУ, проводились путем их испытаний на воздействие внутреннего аварийного взрыва и на сопротивление механической и ветровой нагрузкам (по ГОСТ 26602.5). Взрывные испытания проводились в кубической камере с использованием пропановоздушной смеси стехиометрического состава. Взрывное давление фиксировалось датчиками избыточного давления. Видеосъемка процесса взрыва производилась скоростными камерами.

Результаты. Проанализированы особенности предохранительных конструкций, используемых для снижения давления, возникающего при внутренних аварийных взрывах. По результатам испытаний построены и проанализированы осциллограммы взрывного давления. Показано, что использование при тестировании ПК на работоспособность статических (ветровых или механических) нагрузок взамен взрывных может привести к существенному искажению результатов тестирования. Экспериментально установлено, что тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки.

Выводы. Замена при испытании ПК взрывных нагрузок на статические может привести к их несрабатыванию при аварийном взрыве в реальных условиях, что может повлечь за собой обрушение строительных конструкций и человеческие жертвы. Таким образом, тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки.

Ключевые слова: аварийный взрыв; взрывные нагрузки; легкосбрасываемые конструкции; предохранительные запорные устройства; взрывозащита

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность руководителю научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» ИКБС НИУ МГСУ Александру Андреевичу Комарову за помощь при проведении анализа результатов экспериментов.

Для цитирования: Корольченко А.Д., Громов Н.В. Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 69–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78

✉ Корольченко Антон Дмитриевич, e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Destructible elements of safety structures used to minimize the consequences of explosive accidents in premises

Anton D. Korolchenko ✉, Nikolai V. Gromov

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the present publication is caused by the fact that during the development of constructive decisions of safety locking devices (SLD) designers often use elements and materials, which are

fundamentally not applicable for these purposes. The peculiarities of safety structures (SS) and light removable structures (LRS) used in buildings and premises where internal emergency explosion is possible are analyzed. The results of experimental studies on testing the performance of real structures are given.

Objective. Determination of the possibility of SS and LRS application at explosive objects, as well as restrictions on their fastening elements and used materials.

Materials and methods. Studies of LRS fixed by SLD were carried out by means of their tests on the impact of internal emergency explosion and on resistance to mechanical and wind loads (according to GOST 26602.5). Explosion tests were carried out in a cubic chamber using a propane-air mixture of stoichiometric composition. Overpressure sensors recorded explosive pressure. Video recording of the explosion process was done by speed cameras.

Results. The features of safety structures used to reduce the pressure generated by internal accidental explosions were analyzed. Explosive pressure oscillograms were constructed and analyzed based on the test results. It is shown that the use of static (wind or mechanical) loads instead of explosive loads in SS performance testing can lead to significant distortion of test results. It is experimentally established that testing of specimens of safety structures for their serviceability should be carried out only by modelling of explosive load.

Conclusions. Substitution of explosive loads for static loads during SS testing may lead to their failure in case of emergency explosion in real conditions, which may result in collapse of building structures and human casualties. Thus, testing of specimens of safety structures for their operability should be carried out only by modelling of explosive load.

Keywords: emergency explosion; explosive loads; light removable structures; safety locking devices; explosion protection

Acknowledgements. The authors of the article express their gratitude to the head of the Research Centre "Explosion Safety" of the Institute of Integrated Safety in Construction of the Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGUSU) Komarov Alexander Andreevich for the help in the analysis of the experimental results.

For citation: Korolchenko A.D., Gromov N.V. Destructible elements of safety structures used to minimize the consequences of explosive accidents in premises. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):69-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78 (rus).

✉ Korolchenko Anton Dmitrievich, e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Введение

Актуальность настоящей публикации обусловлена тем, что при разработке конструктивных концепций предохранительных устройств, перекрывающих сбросные (как правило, оконные) проемы, проектировщики часто используют элементы и материалы, которые принципиально не применимы для этих целей. Это связано с тем, что основная функция предохранительных конструкций (ПК) заключается в том, что они должны достаточно быстро вскрыться или разрушиться под действием избыточного давления, создаваемого внутренним аварийным взрывом. Процесс развития взрыва скоротечен, и избыточное давление, создаваемое взрывом, носит явно выраженный нестационарный характер. Длительность взрыва в зависимости от размеров помещения и взрывоопасного облака составляет не более 1 с при градиентах избыточного давления 10–200 кПа/с [1–4]. Это обстоятельство не учитывается большинством проектировщиков, которые имеют дело в основном со стационарными процессами и поэтому не обладают необходимым опытом проектирования устройств, работающих в нестационарных условиях. Кроме этого, особенности предохранительных конструкций определяются областью их применения. Так, реализация основной функции ПК может потребоваться только в условиях аварийного взрыва, вероятность которого достаточно мала. Следовательно, предохранительные конструкции должны сохранять работоспособность

на протяжении всего срока их службы. При этом велика вероятность, что их основная функция (срабатывание) так и не будет востребована, поскольку аварийного взрыва может и не быть.

Перечисленные особенности предохранительных конструкций накладывают определенные ограничения на их крепежные элементы и используемые материалы. Описанию этих особенностей и посвящена настоящая публикация.

Материалы и методы

Прежде всего рассмотрим результаты экспериментальных исследований процесса вскрытия предохранительных конструкций в виде легко-сбрасываемых конструкций (ЛСК), фиксируемых предохранительными запорными устройствами (ПЗУ). Механические испытания десяти образцов ПЗУ 2032А показали, что среднее арифметическое усилие разрушения ПЗУ составляет 197,82 Н.

В испытаниях использовали оконный блок, фиксируемый четырьмя ПЗУ, с размерами 1550 × 1250 мм. Результаты испытаний на ветровое воздействие показали, что разрушение ПЗУ происходит при однократном воздействии перепада давления 320 Па. Это несколько меньше, чем усилие разрушения, которое было получено в ходе механических испытаний и должно составлять около $4 \cdot 197,82 \text{ Н} / (1,55 \cdot 1,25 \text{ м}^2) = 408 \text{ Па}$. Еще большее усилие, необходимое для вскрытия ЛСК (разрушения ПЗУ), потребовалось при проведении взрывных испытаний, т.е. испытаний, полностью



Рис. 1. Общий вид взрывной камеры
Fig. 1. General view of the blasting chamber

соответствующих реальным условиям эксплуатации ЛСК. При проведении серии из трех взрывных испытаний установлено, что давления вскрытия ЛСК составляли 600, 630 и 710 Па, что в 1,5 раза больше давления, полученного путем механических испытаний ПЗУ, и почти в 2 раза больше давления, полученного при однократном воздействии перепада давления при ветровых испытаниях [5–7].

Взрывные испытания проводились в кубической камере с внутренним объемом 10 м³, общий

вид которой представлен на рис. 1. При взрывных испытаниях использовалась пропановоздушная смесь стехиометрического состава. Сбросной проем площадью 1600 × 1300 мм закрывался испытуемой ЛСК. Смесь зажигалась искрой от источника, находящегося в центре камеры. Взрывное давление фиксировалось двумя датчиками с частотой опроса аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 1000 Гц (1000 опросов в секунду). Видеосъемка процесса взрыва осуществлялась скоростной камерой со скоростью протяжки 1000 кадров в секунду (или с интервалом 1,0 мс между кадрами). Цель эксперимента заключалась в определении давления вскрытия ЛСК. Было проведено три опыта. Моменты вскрытия ЛСК представлены на рис. 2.

Для пояснения методики определения давления вскрытия ЛСК рассмотрим результаты одного из проведенных опытов.

На рис. 3 приведена осциллограмма взрывного давления в камере, полученного в эксперименте 1. За нулевой момент времени принят момент зажигания смеси от искры.

При вскрытии ЛСК площадь сбросного проема увеличивается, и в определенный момент времени темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом [8–11]. Этому моменту соответствует перегиб на осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить путем анализа осциллограммы давления. Для этой процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давле-

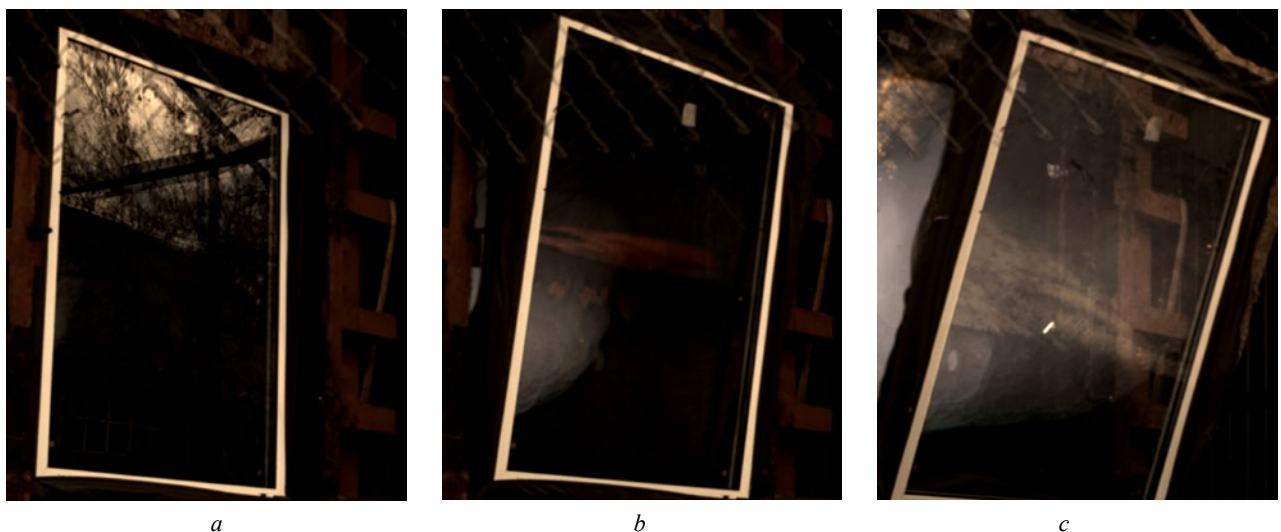


Рис. 2. Моменты процесса вскрытия ЛСК, зафиксированные скоростной камерой со скоростью протяжки 1000 кадров в секунду:
a — исходное состояние ЛСК; *b* — выброс ЛСК из проема; *c* — начало сброса продуктов взрыва из камеры в атмосферу
Fig. 2. Moments of the process of opening the LRS, recorded by a high-speed camera with a transmission speed of 1,000 frames per second: *a* — initial state of the LRS; *b* — release of LRS from the opening; *c* — beginning of the discharge of explosion products from the chamber into the atmosphere

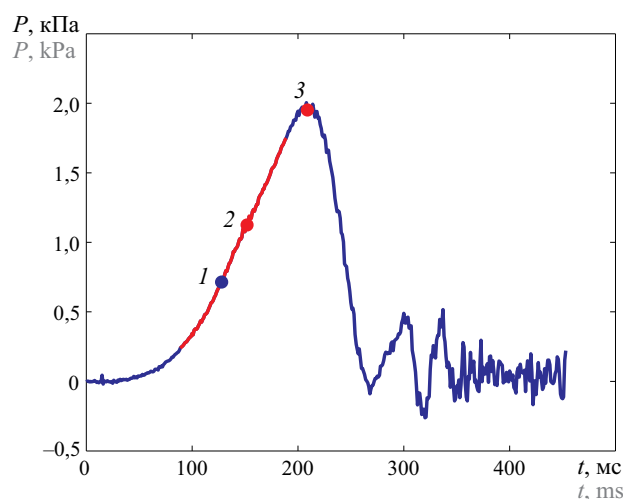


Рис. 3. Осциллограмма взрывного давления в испытательной камере (эксперимент 1): 1 — 128 мс, 0,71 кПа; 2 — 152 мс, 1,13 кПа; 3 — 209 мс, 1,95 кПа

Fig. 3. Oscillogram of the explosive pressure in the test chamber (Experiment 1): 1 — 128 ms, 0.71 kPa; 2 — 152 ms, 1.13 kPa; 3 — 209 ms, 1.95 kPa

ния (между точками, соответствующими моментам 89 и 189 мс), который выделен на рис. 3 красным цветом.

На рис. 4 приведены результаты обработки указанного участка осциллограммы. В точке, соответствующей моменту времени $t = 152$ мс, производная имеет максимум, который означает превышение темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем над темпом нарастания давления вследствие взрывного горения.

Из рис. 4, *b* следует, что в момент $t = 152$ мс градиент взрывного давления достигает значительной

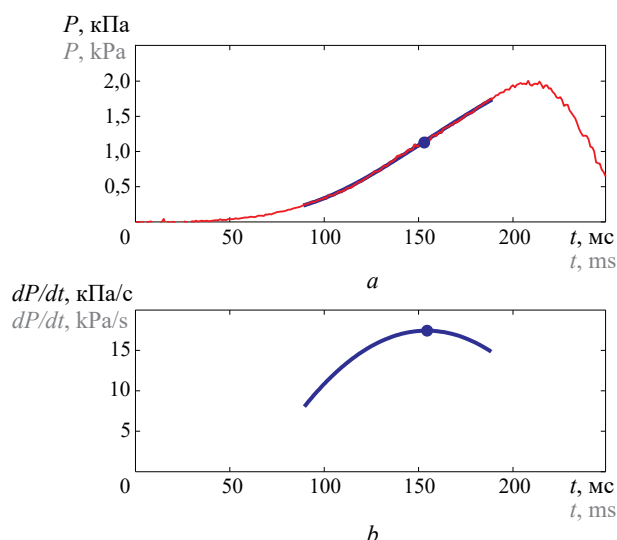


Рис. 4. Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в испытательной камере (эксперимент 1): *a* — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; *b* — его производная

Fig. 4. Results of processing the explosion pressure oscillogram in the test chamber (Experiment 1): *a* — a fragment of the processed oscillogram; *b* — its derivative

величины — 17,5 кПа/с. Этому моменту времени соответствует взрывное давление 1,13 кПа (см. рис. 4, *a*).

Расчеты показали, что видимая скорость пламени на момент вскрытия ЛСК составляет около 2 м/с. Зная видимую скорость пламени, можно определить площадь вскрытого проема на момент перегиба в зависимости давления от времени, который отмечен точкой на рис. 4. Тогда по параметрам ЛСК можно определить смещение конструкции под действием силы давления. В данном эксперименте авторами было получено, что в момент времени 154 мс ЛСК сместилась на 11,3 мм.

Расчет кинематики ЛСК (в обратном по времени направлении) показывает, что начало ее движения (вскрытия) должно было произойти на 128-й мс. В этот момент давление в камере составляло 0,71 кПа. Из расчетов следует, что если смещение (отрыв) ЛСК происходит на 128-й мс, то к моменту 154 мс ее скорость будет равняться 0,93 м/с, а смещение составит 11,7 мм, что примерно соответствует полученному ранее значению смещения ЛСК на 11,3 мм.

В итоге было получено, что в первом эксперименте давление, при котором произошло вскрытие ЛСК, составило 0,71 кПа, а вскрытие ЛСК произошло на 128-й мс.

В двух других опытах давления вскрытия ЛСК были равны 0,60 и 0,63 кПа, что также значительно больше по сравнению с данными, полученными при ветровых и механических испытаниях.

Указанные расхождения, полученные при динамических (взрывных) и статических (ветровых и механических) испытаниях, связаны с тем, что разрушающее действие динамических нагрузок может значительно отличаться от статических. Применительно к ПЗУ это относится в основном к типу материала, из которого изготовлено ПЗУ. Например, при использовании в изделии хрупких материалов его разрушение под воздействием динамической нагрузки происходит при давлении, превышающем критическое давление на разрыв, а под воздействием статической нагрузки его разрушение определяется критическим давлением на изгиб.

Наиболее наглядно данное явление можно продемонстрировать на примере разрушения стекла при воздействии на него динамической (взрывной) и статической нагрузок.

Напомним распространенное соотношение для определения избыточного давления, при котором происходит вскрытие стекол [12–17]:

$$P_{\text{вскр}} = 3k\varphi, \quad (1)$$

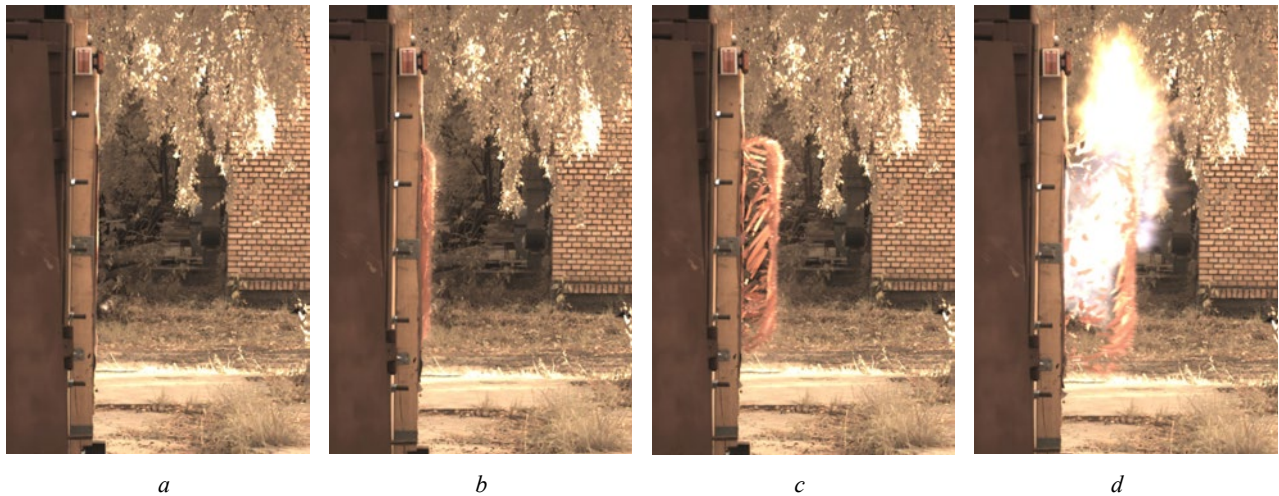


Рис. 5. Моменты процесса вскрытия остекления при внутреннем взрыве: *a* — 208 мс, 9,95 кПа; *b* — 212 мс, 10,64 кПа; *c* — 216 мс, 11,32 кПа; *d* — 220 мс, 11,80 кПа

Fig. 5. The process of opening the glazing during an internal explosion: *a* — 208 ms, 9.95 kPa; *b* — 212 ms, 10.64 kPa; *c* — 216 ms, 11.32 kPa; *d* — 220 ms, 11.80 kPa

где k — коэффициент, учитывающий поправку на площадь и толщину стекла;

ϕ — коэффициент, учитывающий форму стекла.

Коэффициенты k и ϕ определяются по соответствующим таблицам и графикам. Например, для стекла толщиной 4 мм и площадью 1 м² получаем, что давление вскрытия $P_{\text{вскр}} = 3 \cdot 0,55 \cdot 1,15 = 1,90$ кПа.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение процесса вскрытия остекления при воздействии на него взрывного давления, реализуемого при авариях.

Экспериментальные исследования проводились в кубической камере с линейным внутренним размером 2 м. Размеры единственного сбросного проема, расположенного на одной из граней кубической камеры, составляли 1,080 × 1,080 м. Сбросной проем перекрывался обычным одинарным стеклом толщиной 4 мм и размером 1 × 1 м. Стекло вставлялось в проем и крепилось на штапики с резиновыми уплотнителями. Измерение взрывного давления осуществлялось двумя датчиками измерения избыточного давления APZ 3420 с частотой выборки сигнала 5000 Гц (интервал времени между отсчетами давления — 0,2 мс). Фиксация процессов взрыва и вскрытия стекла осуществлялась видеосъемкой с помощью высокоскоростной камеры Evercam F 1000-4-C со скоростью 500 кадров в секунду и второй скоростной камеры — со скоростью 236 кадров в секунду (с интервалом 4,23 мс между кадрами). В качестве горючего использовался пропан. Смесь стехиометрического состава, которой полностью заполняли камеру, воспламенялась искрой от источника, расположенного в центре камеры. Процесс регистра-

ции сигнала с датчиков давления и процесс кино съемки были полностью синхронизированы.

На рис. 5 приведены четыре снимка моментов взрыва пропановоздушной смеси в камере, в результате которого произошло вскрытие одинарного остекления, перекрывающего сбросной проем.

На рис. 6 представлена осциллограмма взрывного давления, полученная в ходе эксперимента. Полезный сигнал при помощи цифровой фильтрации был очищен от высокочастотных шумов (выше 100 Гц). Точки 1–4 на рис. 6 соответствуют моментам процесса вскрытия на рис. 5.

Анализ рис. 5 и результатов расчетов, описывающих колебательный процесс полотна стекла,

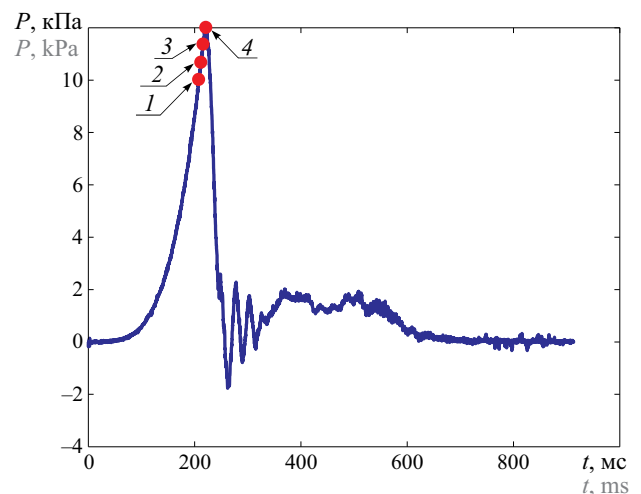


Рис. 6. Осциллограмма взрывного давления: 1–4 соответствуют кадрам на рис. 5; 1 — 208 мс, 9,95 кПа; 2 — 212 мс, 10,64 кПа; 3 — 216 мс, 11,32 кПа; 4 — 220 мс, 11,80 кПа

Fig. 6. Oscillogram of explosive pressure: 1–4 correspond to frames in Fig. 5; 1 — 208 ms, 9.95 kPa; 2 — 212 ms, 10.64 kPa; 3 — 216 ms, 11.32 kPa; 4 — 220 ms, 11.80 kPa

позволяет описать картину вскрытия стекла под воздействием на него динамической нагрузки от взрыва следующим образом.

При достижении избыточным давлением значения 2 кПа, что примерно соответствует давлению вскрытия стекла, полученному расчетом по формуле (1), в стекле возникают значительные изгибные напряжения. При статическом нагружении полотна стекла и таком давлении происходит сначала локальное, а потом и его полное разрушение [18–20].

При динамическом нагружении стекла возникает колебательный процесс с увеличивающейся амплитудой вынужденных колебаний. Этот процесс продолжается примерно до момента времени 208 мс (давление 9,95 кПа) (см. рис. 5, *a*). На нем видно, что стекло сохранило свою целостность, хотя многократные колебания и возникающие при этом внутренние изгибные напряжения привели к многочисленным внутренним изломам. На 212-й мс (давление 10,64 кПа) изгибные колебания панели и возникающие при этом изгибные напряжения приводят к полному растрескиванию полотна стекла, что отражено на рис. 5, *b*. Дальнейший рост давления и прогиб стекла приводят к превышению внутренних напряжений, работающих на растяжение, над критическими напряжениями на растяжение. В этот момент происходит отрыв центральной, полностью растрескавшейся части стекла от границ крепления стекла (см. рис. 5, *c*). Завершающая стадия вскрытия стекла представлена на рис. 5, *d*. В этот момент площадь вскрытого проема обеспечивает достаточный сброс давления, что приводит к формированию максимума взрывного давления.

При выбросе газовой среды из проема при вскрытии ЛКС мелкие осколки выбитого стекла (см. рис. 5, *d*) разлетаются на расстояние около 25 м. Картонная мишень, расположенная в 15 м от сброс-

ного проема, достаточно сильно была повреждена осколками стекла.

Анализ фотоматериалов и экспериментальных осциллограмм взрывного давления показал, что вскрытие стекла произошло на 214-й мс при давлении внутри камеры 10,98 кПа, что в 5,5 раз превышает давление вскрытия стекла при стационарном типе его нагружения. Как указывалось ранее, при стационарном характере нагружения стекла принимаются во внимание и рассматриваются изгибные напряжения, возникающие в стекле, которые при динамическом нагружении играют второстепенную роль [21–23].

Завершая обзор конструктивных особенностей ПК, необходимо напомнить, что параметры их вскрытия являются не эксплуатационными характеристиками конструкции, а аварийными.

Для примера рассмотрим результаты тестирования предохранительной конструкции фонарного типа, в качестве ПЗУ использовались магниты.

Исследование параметров ПК проводилось в кубической камере с внутренним размером грани 2 м. ПК тестировалась на предмет ее вскрытия при взрывном горении пропановоздушной смеси стехиометрического состава. Сбросной проем размером $1,8 \times 1,8$ м был оборудован фонарем с двумя распашными створками. Масса каждой створки составляла 26,4 кг. Роль ПЗУ выполняли шесть магнитов, удерживающих вес 8 кгс (или 78,45 Н), которые были закреплены на поворотной стойке для лучшего прилегания к запорной пластине. Взрывное давление фиксировалось двумя датчиками. Фиксация процесса взрыва осуществлялась двумя скоростными камерами. Одна из них была расположена сбоку и фиксировала смещение створок со скоростью 500 кадров в секунду (или с интервалом 2 мс между кадрами). Вторая камера была расположена чуть выше створок и вела съемку



Рис. 7. Снимки с первой (*a*) и второй (*b*) кинокамер в момент реализации максимального взрывного давления (эксперимент 4)
Fig. 7. Photos from the first (*a*) and second (*b*) movie cameras at the moment of maximum explosive pressure (Experiment 4)

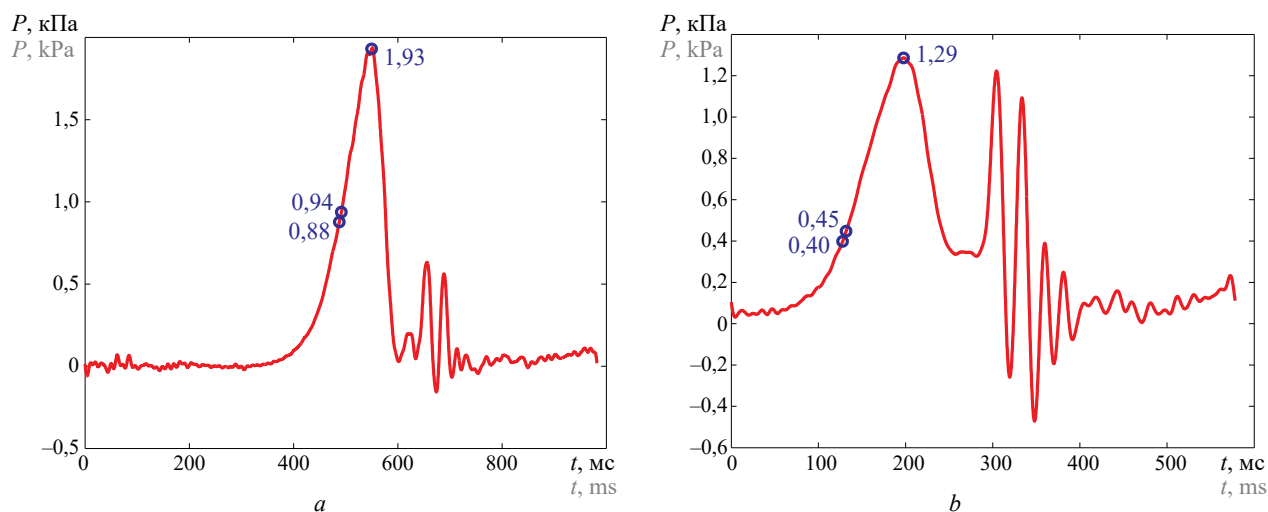


Рис. 8. Осциллограммы взрывного давления в испытательной камере в экспериментах 4 (а) и 2 (б)

Fig. 8. Oscillograms of explosive pressure in the test chamber in experiments 4 (a) и 2 (b)

со скоростью протяжки 117 кадров в секунду (или с интервалом 8,54 мс между кадрами).

Было испытано два фонаря. С каждым из них было проведено по два эксперимента: 1 и 2 — с первым фонарем, 3 и 4 — со вторым. Рассмотрим результаты экспериментов 2 и 4.

Снимки с первой и второй видеокамер в момент реализации максимального взрывного давления в испытательной камере при проведении эксперимента 4 представлены на рис. 7.

На рис. 8 приведены осциллограммы взрывного давления в экспериментах 4 и 2, очищенные от высокочастотных составляющих (выше 100 Гц). Точками отмечены: максимальное взрывное давление в экспериментах 4 и 2 (соответственно, 1,93 и 1,29 кПа) и диапазон зафиксированного на основании киносъемки давления вскрытия створок фонаря (соответственно, 0,88–0,94 и 0,40–0,45 кПа).

В итоге было получено, что давление вскрытия створок фонаря в эксперименте 4 составило 0,88–0,94 кПа, а в эксперименте 2 — 0,40–0,45 кПа.

Значительное различие в параметрах давления вскрытия, полученных на разных образцах фонарей, обусловлено тем, что магнитные запоры зачастую неплотно прилегают к приемным планкам

и поэтому не всегда надежно фиксируют створки. Кроме этого, влияние времени на состояние магнитов в данной ситуации выглядит достаточно проблематично. Поэтому правомерность использования такого или подобного типа запорных устройств в противовзрывных ПК вызывает сильное сомнение.

Выводы

Проанализированы особенности предохранительных конструкций, используемых для снижения давления, возникающего при внутренних аварийных взрывах. Экспериментально показано, что тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки. Использование в этих испытаниях статических или квазистатических нагрузок взамен взрывных может привести к существенному искажению (в ряде случаев в несколько раз) результатов тестирования. Итогом может стать несрабатывание прошедших тесты ПК при аварийном взрыве в реальных условиях, что может повлечь за собой обрушение строительных конструкций и человеческие жертвы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилугин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М. : Стройиздат, 1988. 314 с.
2. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
3. Bradley D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations / Molkov V.V. (ed.). М. : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. Pp. 51–59.
4. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.

5. *Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M.* Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers // *Fire Safety Journal*. 2005. Vol. 40. Issue 4. Pp. 307–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
6. *Chen D., Wu C., Li J., Liao K.* A numerical study of gas explosion with progressive venting in a utility tunnel // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 162. Pp. 1124–1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
7. *Chmielewski R., Bqk A.* Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. P. 102815. DOI: 10.1016/j.job.2021.102815
8. *Zhan Li, Li Chen, Qin Fang, Wensu Chen, Hong Hao, Rong Zhu, Kang Zheng.* Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 129. Pp. 66–79. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.013
9. *Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanchao Mao, Xiaohu Yao.* Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building // *Fuel*. 2023. Vol. 353. P. 129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
10. *Jialin Li, Xuebiao Wang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Su Zhang.* Effect of concentration and ignition position on vented methane-air explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104334. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104334
11. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В.* Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. № 31 (6). С. 78–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90
12. *Максакова А.В.* Исследование нормативной документации на тему легкосбрасываемой конструкции и предложение по его изменению // *Молодежные инновации : сб. мат. сем. молодых ученых в рамках XXIII Междунар. научн. конф. М., 2020. С. 144–147.*
13. *Gorev V.A.* Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1425. P. 012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
14. *Пилюгин Л.П.* Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.
15. *Шлег А.М.* Определение параметров легкосбрасываемых конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2002. 201 с.
16. *Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А.* Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
17. *Корольченко О.Н., Корольченко А.Д.* Определение давления вскрытия легкосбрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921
18. *Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г.* Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // *Промышленное строительство*. 1969. № 6. С. 19–22.
19. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
20. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* Dynamic effects at internal deflagration explosions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 603. P. 052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
21. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Фан Т.А.* Особенности определения коэффициента динамичности при импульсных нагрузках // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. № 27 (2–3). С. 37–43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43
22. *Polandov Iu., Korolchenko D.* The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. Art. 01040. DOI: 10.1051/matecconf/201710601040
23. *Громов Н.В.* Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газопаровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.

REFERENCES

1. *Pilyugin L.P.* *Constructions of explosive production facilities*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 314. (rus).
2. *Komarov A.A.* *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).

3. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions. *Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*. Molkov V.V. (ed.). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
4. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
5. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M. Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers. *Fire Safety Journal*. 2005; 40(4):307-319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
6. Chen D., Wu C., Li J., Liao K. A numerical study of gas explosion with progressive venting in a utility tunnel. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 162:1124-1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
7. Chmielewski R., Bąk A. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:102815. DOI: 10.1016/j.job.2021.102815
8. Zhan Li, Li Chen, Qin Fang, Wensu Chen, Hong Hao, Rong Zhu, Kang Zheng. Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2019; 129:66-79. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.013
9. Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanchao Mao, Xiaohu Yao. Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building. *Fuel*. 2023; 353:129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
10. Jialin Li, Xuebiao Wang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Su Zhang. Effect of concentration and ignition position on vented methane-air explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104334. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104334
11. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):78-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-9 (rus).
12. Maksakova A.V. Study of regulatory documentation on the topic of easily resettable structures and proposals for changing it. *Youth Innovations : collection of materials from the seminar of young scientists within the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow, 2020; 144-147. (rus).
13. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425:012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
14. Pilyugin L.P. *Maintenance explosion proof buildings with relief designs*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 224. (rus).
15. Shleg A.M. *Determination of the parameters of easily dropped structures : Dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2002; 201. (rus).
16. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
17. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determining the burst pressure of vent structures with account taken of wind loads. *Vestnik MGSU*. 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921 (rus).
18. Strel'chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of ejection structures in explosive production buildings. *Industrial Engineering*. 1969; 19-22. (rus).
19. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
20. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. Dynamic Effects at Internal Deflagration Explosions. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019; 603(5):052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
21. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Phan T.A. Features of determination of the dynamic amplification factor under impulse loads. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):37-43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43 (rus).
22. Polandov Iu., Korolchenko D. The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106(01040):8. DOI: 10.1051/mateconf/201710601040
23. Gromov N.V. *Improving the technical system for ensuring the explosion resistance of buildings during explosions of gas-steam-air mixtures : dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2007; 134. (rus).

Поступила 11.09.2023, после доработки 23.10.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received September 11, 2023; Received in revised form October 23, 2023;

Accepted November 15, 2023

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, соискатель на уч. ст. канд. техн. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

ГРОМОВ Николай Викторович, канд. техн. наук, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

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

Information about the authors

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Explosion Safety Research Center, Institute of Integrated Safety in Construction, Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Nikolay V. GROMOV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Senior Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 79–82
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):79-82

УДК 614.84

DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.79-82

Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены статистические данные, отражающие состояние зарядной инфраструктуры электромобилей в России. Показаны основные различия между типами зарядных станций. Выполнен анализ действующих нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности зарядных станций и мест парковки электромобилей. Рассмотрены требования зарубежных нормативных документов по вопросам организации безопасного хранения электромобилей и мест их подзарядки. Даны примеры реализации систем раннего обнаружения и тушения пожара с участием электромобиля.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор; зарядная станция; государственный стандарт; система пожаротушения; пожарный извещатель; теплота сгорания; тепловой поток

Для цитирования: Харламенков А.С. Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 79–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.79-82

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

Fire safety of electric vehicle parking spaces

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

Statistical data reflecting the state of electric vehicles charging infrastructure in Russia are presented. The main differences between the types of charging stations are shown. The analysis of current regulatory documents on ensuring fire safety of charging stations and parking places for electric vehicles is made. The requirements of foreign regulatory documents on the organization of safe storage of electric vehicles and places of their recharging are considered. Examples of realization of systems of early detection and fire extinguishing involving an electric car are given.

Keywords: lithium-ion battery; charging station; state standard; fire extinguishing system; fire detector; combustion heat; heat flow

For citation: Kharlamenkov A.S. Fire safety of electric vehicle parking spaces. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):79-82. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.79-82 (rus.)

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



ВОПРОС

В рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2023 г. [1] были представлены основные способы тушения пожара, применяемые на практике и в сериях испытаний при горении тяговых литий-ионных батарей электромобилей. Отмечено, что наиболее эффективным на сегодняшний день считается способ подачи огнетушащего вещества (воды) непосредственно во внутреннее пространство аккумуляторного блока через отверстие, создаваемое с помощью режущего ствола (типа «Cobra»), ствола-шипа или «огнетушащего копья».

Важной составляющей успешной ликвидации пожара электромобиля является раннее обнаружение неисправности отдельных ячеек литий-ионного аккумуля-

лятора (далее ЛИА) и последующее ограничение распространения горения на соседние неповрежденные участки батареи. В современных электромобилях производители уделяют большое внимание разработке защитных мер, обеспечивающих безопасную эксплуатацию ЛИА. Внедряются новые подсистемы мониторинга режимов работы отдельных ячеек аккумуляторного блока (температура, напряжение, ток, перезаряд, переразряд и т.д.) и его охлаждения. Работа таких подсистем реализуется на базе общей системы управления батареями (BMS – Battery Management System), которая постоянно совершенствуется. BMS не способна предотвратить развитие пожара в случае дорожно-транспортного происшествия с участием электромобиля и механического повреждения его

тяговой батареи. В таких случаях наиболее эффективным средством ограничения распространения пожара является противопожарное полотно, позволяющее изолировать горящий автомобиль от соседних транспортных средств и объектов.

Часто фиксируются случаи воспламенения ЛИА в процессе подзарядки электромобиля в местах его хранения (стоянки, парковки), поэтому организационные и технические меры по обеспечению пожарной безопасности мест подзарядки являются неотъемлемой частью систем предотвращения пожаров и противопожарной защиты.

Какими рекомендациями и нормативными требованиями следует руководствоваться при организации хранения и подзарядке электромобилей?

ОТВЕТ

По состоянию на июль 2023 г. число электрокаров (BEV) и гибридных автомобилей (HEV) составило 32,7 тыс. ед.¹ На первые приходится 78,6 %, а на вторые — оставшиеся 21,4 %. К концу сентября 2023 г. в России продано 8752 электромобиля, что почти в 5 раз больше, чем за аналогичный период 2022 г.² Согласно «Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года»³, в структуре рынка автомобильной отрасли электродвигатели к 2030 г. должны составить 5–12 % от всех типов силовых установок, а к 2035 г. — 15–25 %.

В крупных городах все чаще можно встретить припаркованные электрокары, установленные на подзарядку. Подземные парковки современных торговых и жилых комплексов начинают активно оборудовать местами с зарядными станциями. Общее количество зарядных станций (ЭЗС) в России на середину 2023 г. уже составило более 4,3 тыс. ед. и продолжает расти. По состоянию на начало июля 2023 г. действует 439 «быстрых» ЭЗС⁴. До конца года планируется установить 659 «быстрых» ЭЗС в 32 регионах России, а в 2024 г. еще 1437 ед.⁵ Таким образом, к концу 2024 г. должно быть создано почти 3 тыс. ЭЗС.

¹ Информация аналитического агентства «Автостат». URL: <https://www.autostat.ru/news/55588/> (дата обращения: 25.09.2023 г.).

² Информация аналитического агентства «Автостат». URL: <https://www.autostat.ru/news/55799/> (дата обращения: 09.10.2023 г.).

³ Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4261-р.

⁴ Под «быстрой» ЭЗС понимают зарядные станции, питающие аккумуляторные блоки электрокаров постоянным током (DC). Они обладают высокой мощностью 150–200 кВт и более (Тип 4) и позволяют заряжать аккумуляторную батарею современного электромобиля за 0,5–1,5 ч. Помимо «быстрых» ЭЗС для зарядки используются более распространенные «стандартные» ЭЗС, которые питают батарею переменным током (AC) и обладают более низкой мощностью до 43 кВт (Тип 3), что позволяет зарядить аккумулятор электрокара за 3–4,5 ч. Также большое распространение получили «медленные» ЭЗС мощностью 3,8 и 7,6 кВт (Тип 1 и 2 соответственно) со временем зарядки 6–12 ч.

⁵ Информация аналитического агентства «Автостат». URL: https://www.autostat.ru/editorial_column/55092/ (дата обращения: 09.10.2023 г.).

В связи с активным распространением электромобилей в России за последние годы был введен ряд требований нормативных документов к местам их парковки и зарядки.

В целях обеспечения пожарной безопасности в марте 2022 г. вступил в силу СП 506.1311500.2021⁶, а в 2023 г. был отменен⁷ и включен в состав обновленного СП 113.13330.2023⁸. Документом разрешено осуществлять совместное хранение электромобилей и подзаряжаемых гибридных автомобилей (в том числе машиномест с оборудованием для их зарядки) с автомобилями, имеющими двигатель внутреннего сгорания.

Машиноместа, оснащенные оборудованием для зарядки электрокаров, допускается размещать на открытых площадках, а также в открытых и закрытых автостоянках класса конструктивной пожарной опасности С0, С1 (за исключением механизированных и полумеханизированных стоянок автомобилей).

Для закрытых автостоянок данные машиноместа с ЭЗС Типа 1 и 2 (до 32 А) допускается размещать ниже первого подземного или подвального этажа и использовать только для зарядки автомобилей с аккумуляторами, не выделяющими при зарядке и эксплуатации горючие газы (т.е. тяговые аккумуляторные батареи BEV и HEV). Выполнение подзарядки данных аккумуляторных батарей в помещениях, под навесами и на открытых площадках для хранения (стоянки) транспорта разрешено п. 209 Правил противопожарного режима в РФ (ППР РФ)⁹.

По требованиям СП 113.13330.2023⁸, площадь помещения закрытых автостоянок с наличием машиномест, оборудованных устройствами для зарядки электромобилей, не должна превышать 1200 м². Если общее число указанных машиномест не превышает 10 ед., то выделение их в отдельную пожарную секцию не требуется, и площадь помещения при этом может превышать 1200 м². В остальных случаях часть помещения должна быть выделена в отдельную пожарную секцию. Площадь данной секции отделяется от других секций одним из следующих способов:

- противопожарными перегородками 1-го типа;
- зонами (проездами), свободными от пожарной нагрузки, шириной не менее 8 м;
- зонами (проездами), свободными от пожарной нагрузки, шириной не менее 6 м.

В последнем случае посередине указанной зоны должны устанавливаться дренчерные завесы или противодымные экраны (шторы). Завесы выполняются в одну нитку с рас-

⁶ СП 506.1311500.2021. Свод правил. Стоянки автомобилей. Требования пожарной безопасности : Приказ МЧС России от 17.12.2021 № 880, введен в действие 01.03.2022 г.

⁷ СП 506.1311500.2021 утратил силу с 10.10.2023 г. на основании Приказа МЧС России от 09.10.2023 № 1035.

⁸ СП 113.13330.2023. Свод правил. Стоянки автомобилей «СНиП 21-02-99*» : Приказ Минстроя России от 05.10.2023 № 718/пр, введен в действие 05.11.2023 г.

⁹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (в ред. от 24.10.2022) : утв. постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479, введен в действие 01.01.2021 г.

четным числом оросителей при обеспечении по всей длине удельного расхода 1 л/(с·м). Противодымные экраны должны автоматически опускаться при пожаре на расчетную высоту.

В независимости от площади помещения данные машино-места подлежат оборудованию автоматическими установками пожаротушения (АУПТ). При сработке систем противопожарной защиты (пожарной сигнализации, АУПТ и др.) все электрооборудование ЭЗС должно обесточиваться.

По надежности электроснабжения оборудование ЭЗС относится к III категории. При этом места для зарядки электромобилей должны располагаться вдоль проездов для автомобилей и проходов людей. Зарядное устройство ЭЗС размещается не далее 1 м от зарядной площадки с размерами машино-места 3 × 6 м. Степень защиты оболочки электрооборудования ЭЗС должна быть не ниже IP44, а для стоянок открытого типа — не ниже IP54 согласно требованиям ГОСТ 14254–2015¹⁰. Конструкция ЭЗС и мест их размещения должна обеспечивать безопасную работу зарядной инфраструктуры в условиях попадания дождя, снега и сильного ветра.

Для предотвращения токовой перегрузки, коротких замыканий, появления дифференциальных токов (токов утечки) электрические сети ЭЗС следует оснащать автоматическими выключателями и устройствами защитного отключения (УЗО).

Помимо СП 113.13330.2023⁸ подготовлен проект Изменения № 7 к СП 256.1325800.2016¹¹, в который внесен дополнительный подраздел 7.4 «Зарядные станции и пункты зарядки для электромобилей». В данном подразделе отражены требования к размещению различных типов ЭЗС и их электроснабжению.

В зарубежных странах также ведется активное внедрение ЭЗС как на открытых, так и на закрытых парковочных местах. С распространением мест стоянки и зарядки электромобилей вводятся новые требования к организации парковочных мест и характеристик систем обнаружения и тушения пожара с участием BEV.

Так, для людей с ограниченными возможностями законами США (*Americans with Disabilities Act (ADA)* и *Architectural Barriers Act (ABA)*)¹² разработан ряд организационно-технических решений по размещению машино-мест на открытых и закрытых парковках с на-

личием ЭЗС. Такие места для зарядки должны иметь размеры парковочного места с минимальной шириной не менее 132 дюймов (3,35 м) и минимальной длиной не менее 240 дюймов (6,1 м). Рядом с местом для зарядки автомобиля должен быть проход шириной не менее 60 дюймов (1,52 м) и длиной во всю длину парковочного места. Такие размеры пространства позволяют не только обеспечить удобный подъезд электромобиля к зарядному устройству и посадку/высадку пассажиров с ограниченными возможностями, но в то же время увеличить пространство между соседними машино-местами. Наличие расстояния в 1,52 м будет способствовать снижению вероятности распространения пламени и опасного воздействия тепловых потоков от горящего электромобиля на расположенные рядом с ним транспортные средства и конструкции. Например, в проведенных исследованиях [2–4] и отчетах¹³ фиксировались выбросы пламени из-под электромобиля на расстояние более 1 м по горизонтали. Эти выбросы способствовали росту интенсивности горения не только BEV, но и распространению пламени на параллельно припаркованный автомобиль (0,6 м от горящего BEV [2]).

В США общие требования к установке ЭЗС представлены в общем документе NFPA 70 «*National Electrical Code*» (пункт 511.10 «Специальное оборудование») и стандартах UL 2202 (требования к ЭЗС электромобилей), UL 2594 (требования к оборудованию ЭЗС электромобилей) и UL 2750 (требования к оборудованию беспроводной ЭЗС электромобилей). Для парковок в стандарте NFPA 88A «*Standard for Parking Structures*» (Глава 7 «Специальная защита от опасностей») даны ссылки на вышеуказанные документы без конкретной информации по обеспечению пожарной безопасности машино-мест с ЭЗС. Также, касательно использования спринклерных систем, в NFPA 88A дается ссылка на стандарт NFPA 13 «*Standard for the Installation of Sprinkler Systems*». В этом стандарте для парковок (п. 4.3.3.2 Прил. А в ред. 2022 г.) были внесены изменения по повышению рекомендуемой классификации опасности для парковочных сооружений с уровня «Обычная опасность (Группа 1)» до «Обычная опасность (Группа 2)», что привело к увеличению требуемой плотности орошения спринклера (6,1–8,1 (мм·мин)/м²). Указанные значения плотности орошения соответствуют интенсивности орошения 0,1–0,135 л/(с·м²). Следует отметить, что по требованиям СП 485.1311500.2020¹⁴ для гаражей и стоянок (группа помещений 2 по таблице А.1) интенсивность орошения должна составлять не менее 0,12 л/(с·м²).

¹⁰ ГОСТ 14254–2015 (IEC 60529:2013). Межгосударственный стандарт. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP) : Приказ Росстандарта от 10.06.2016 № 604-ст, введен в действие 01.03.2017 г.

¹¹ СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа (проект Изменения № 7). URL: <https://www.rst.gov.ru> (<https://clck.ru/36U7ND>) (дата обращения: 16.10.2023 г.).

¹² Рекомендации по проектированию доступных зарядных станций для электромобилей. Design Recommendations for Accessible Electric Vehicle Charging Stations. Technical Assistance Document. U.S. Access Board, 2023. URL: www.access-board.gov/tad/ev/ (дата обращения: 20.10.2023 г.).

¹³ Technical Report FPRF-2020–07. Modern Vehicle Hazards in Parking Structures and Vehicle Carriers / National Fire Protection Association NFPA. 2020. 54 p. URL: www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/modern-vehicle-hazards-in-parking-garages-vehicle-carriers (дата обращения: 22.10.2023 г.).

¹⁴ СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : Приказ МЧС России от 30.08.2020 № 628, введен в действие 01.03.2021 г.

Анализ пожарной опасности при горении BEV показал, что основной вклад в развитие пожара вносит горючий пластик, который является основной пожарной нагрузкой (более 50 % от общего объема) как в BEV, так и в автомобилях с двигателем внутреннего сгорания (ICEV) [3]. При этом величина теплоты сгорания нескольких образцов BEV варьировалась в диапазоне 28,8–30,5 МДж/кг и составила в среднем 30 МДж/кг. Данное значение можно использовать в расчетах удельной пожарной нагрузки при оценке категории помещения по СП 12.13130.2009¹⁵ и определении времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара по Прил. 1 Методики¹⁶. Горение образцов BEV сопровождалось измерением максимального теплового потока ($pHRR$), который составил 6,51–7,25 МВт и общего количества теплоты (THR) — 8,45–9,03 ГДж. Данные показатели оказались несколько ниже аналогичных значений для ICEV — 7,66 МВт и 8,08 ГДж соответственно. Поэтому пожары с участием BEV во многом сопоставимы с пожарами ICEV, но характеризуются более активным распространением огня как на горящий электромобиль, так и на соседние транспортные средства.

Компания Siemens в сотрудничестве с фирмой Danfoss Fire Safety A/S и Датским институтом технологий пожаро-

тушения и безопасности (DBI) провела ряд исследований по обнаружению и тушению пожара на парковочных местах BEV¹⁷. В 2023 г. были проведены испытания системы пожаротушения с помощью водяного тумана под высоким давлением совместно с системой раннего обнаружения пожара на основе мультисенсорных извещателей с функцией анализа угарного газа (CO). Результаты испытаний показали высокую эффективность совместной работы данных систем, которые за счет раннего обнаружения пожара и подачи водяного тумана позволили обеспечить ограничение распространения огня за пределы горящего электромобиля. Также в документе представлены результаты взаимодействия мультисенсорных и аспирационных извещателей, установленных в ЭЗС. В случае возгорания внутри ЭЗС система способна передать сигнал для оповещения обслуживающего персонала и/или отключить неисправную станцию.

Анализ нормативных документов, касающихся вопросов пожарной безопасности, указывает на активное внедрение новых требований по безопасной эксплуатации оборудования ЭЗС и организации парковочных мест электромобилей. Важной составляющей безопасной эксплуатации мест хранения электромобилей и мест размещения ЭЗС является оценка и снижение риска возникновения пожара BEV. Общие подходы к оценке риска и выбора мер по снижению опасности возгорания электромобилей будут рассмотрены в следующей статье.

¹⁵ СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : Приказ МЧС России от 25.03.2009 № 182, введен в действие 01.05.2009 г.

¹⁶ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140, введен в действие 01.09.2023 г.

¹⁷ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140, введен в действие 01.09.2023 г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 4 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 86–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.86-90
2. Cui Y., Liu J., Cong B., Han X., Yin S. Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in Parallel // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 166. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.psep.2022.08.055
3. Kang S., Kwon M., Choi J.Y., Choi S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles // Applied Energy. 2023. Vol. 332. P. 120497. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120497
4. Boehmer H., Klassen M.S., Olenick S.M. Fire Hazard Analysis of Modern Vehicles in Parking Facilities // Fire Technology. 2021. Vol. 57. Pp. 2097–2127. DOI: 10.1007/s10694-021-01113-1

Материал поступил в редакцию 10.11.2023
Received November 10, 2023

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2023 г.

А

Абашкин А.А. см. Пехотиков А.В.
 Абашкин А.А. см. Присадков В.И.
 Абдеев Б.М. см. Недобитков А.И.
 Авдеев В.В. см. Галигузов А.А.
 Акперов Р.Г. см. Пузач С.В.
 Аникин С.Н. см. Григорьев А.Н.
 Антонов С.П., Гаращенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой, № 6, 56

Б

Балаев А.А. см. Пузач С.В.
 Барановский А.С. Защита маломобильных групп населения при пожаре в рамках требований действующих нормативных документов. Необходимость или избыточность? № 1, 9
 Барбин Н.М. см. Прытков Л.Н.
 Бачурин Д.В. см. Пузач С.В.
 Бобринев Е.В. см. Евдокимов В.И.
 Болдрушкиев О.Б. см. Пузач С.В.
 Болодьян И.А., Вогман Л.П., Корольченко Д.А. Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести, № 3, 17
 Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П., Вагнер П. Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор), № 1, 57

В

Вагнер П. см. Брушлинский Н.Н.
 Вогман Л.П. см. Болодьян И.А.

Г

Галигузов А.А., Сердан А.А. (мл.), Яшин Н.В., Авдеев В.В. Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе, № 5, 26
 Гаращенко А.Н. см. Антонов С.П.
 Гасиев А.А., Павлов В.В., Гомозов А.В. Особенности обеспечения пожарной безопасности при проектировании строительных конструкций модульных зданий, № 4, 42
 Голкин А.В. см. Пехотиков А.В.

Голованов В.И. см. Антонов С.П.
 Гомозов А.В. см. Гасиев А.А.
 Гомозов А.В. см. Пехотиков А.В.
 Голов Н.В. см. Константинова Н.И.
 Головина Е.В., Калач А.В. Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны, № 6, 5
 Горбань Ю.И., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г., Туровский А.А. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения, № 4, 58
 Горюнова А.В. см. Ушков В.А.
 Гравит М.В. см. Шабунина Д.Е.
 Григорьев А.Н., Захаревский В.Б., Евтеев Д.С., Аникин С.Н. Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники, № 5, 78
 Григорьева М.П. см. Брушлинский Н.Н.
 Гудзь Ю.В. см. Евдокимов В.И.
 Гусарова А.А. Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий, № 6, 36

Д

Данилов А.И. см. Шабунина Д.Е.
 Дмитриев А.А. см. Ермаков С.А.

Е

Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Гудзь Ю.В., Удавцова Е.Ю. Региональные риски производственных травм и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.), № 3, 82
 Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети, № 5, 40
 Евтеев Д.С. см. Григорьев А.Н.
 Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций, № 2, 44
 Еремина Т.Ю., Сушкова О.В. Исследования характеристик пожарной опасности паркетов исторических объектов с массовым пребыванием людей, № 3, 31
 Ермаков С.А., Дмитриев А.А., Постановова П.Ф., Толстиков Д.О. Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны, № 2, 71

З

Захаревский В.Б. см. Григорьев А.Н.
Золотарев М.Е. см. Ушков В.А.
Зубань А.В. см. Константинова Н.И.
Зыков В.И. см. Пузач С.В.

И

Ивашук Р.А. см. Пехотиков А.В.

К

Калач А.В. см. Головина Е.В.
Каменецкая Н.В., Корольков А.П., Нефедьев С.А., Моторыгин Ю.Д. Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций, № 4, 68
Кондашов А.А. см. Евдокимов В.И.
Константинова Н.И., Зубань А.В., Серков Б.Б., Голов Н.В. Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий, № 5, 16
Корольков А.П. см. Каменецкая Н.В.
Корольченко А.Д. Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам, № 3, 9
Корольченко А.Д., Громов Н.В. Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях, № 6, 69
Корольченко Д.А. см. Болодьян И.А.
Корольченко Д.А. см. Ланской П.С.
Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами, № 1, 69
Корольченко Д.А., Селивёрстов В.И., Саенкова А.Б. Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения, № 4, 77
Косьянова Е.Н. см. Пузач С.В.
Кухарский В.В. см. Самарин И.В.

Л

Ланской П.С., Корольченко Д.А. Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции, № 6, 13
Лебедченко О.С. см. Пузач С.В.

Лучкин С.А. см. Пехотиков А.В.

М

Малютин О.С., Хабибуллин Р.Ш. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова, № 5, 60
Минайлов Д.А. см. Еремина Т.Ю.
Моторыгин Ю.Д. см. Каменецкая Н.В.
Мушлакова С.В. см. Присадков В.И.

Н

Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи, № 2, 18
Немчинов С.Г. см. Горбань Ю.И.
Нефедьев С.А. см. Каменецкая Н.В.
Новиков Н.С. см. Антонов С.П.

П

Павлов В.В. см. Гаснев А.А.
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Голкин А.В., Гомозов А.В. Противопожарные требования к зданиям и сооружениям для отдыха и оздоровления детей, № 5, 5
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Голкин А.В. Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклеевой древесины, № 1, 28
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Расчетная оценка эффективности технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток при пожаре в жилых зданиях, № 3, 69
Пехотиков А.В., Ивашук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий, № 2, 59
Поладов Ю.Х. Задача о гистерезисе в работе предохранительного клапана прямого действия, № 4, 15
Полетаев Н.Л. Взрывоопасность взрывзвеси сухой молочной сыворотки, № 1, 51
Постаногова П.Ф. см. Ермаков С.А.
Присадков В.И., Мушлакова С.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий, № 4, 5
Присадков К.В. см. Присадков В.И.
Прытков Л.Н., Барбин Н.М., Титов С.А. Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя, № 2, 33

Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Щетнев К.П., Косьянова Е.Н. Экспериментальное определение показателей пожарной опасности технических масел в маломасштабных установках, № 6, 47

Пузач С.В., Бачурин Д.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Балаев А.А. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах, № 1, 41

Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200, № 2, 9

Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Холостов А.Л., Чистяков Т.И. Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки, № 5, 49

С

Саенкова А.Б. см. Корольченко Д.А.

Самарин И.В., Кухарский В.В. Учет влияния человеческого фактора на основе стратегического планирования в мониторинге опасных ситуаций при внедрении цифровых двойников в автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности объектов ТЭК, № 6, 25

Самарин И.В. см. Евсиков А.А.

Селивёрстов В.И. см. Корольченко Д.А.

Сердан А.А. (мл.) см. Галигузов А.А.

Серков Б.Б. см. Константинова Н.И.

Соколов С.В. см. Брушлинский Н.Н.

Сушкова О.В. см. Еремина Т.Ю.

Т

Титов С.А. см. Прытков Л.Н.

Толстиков Д.О. см. Ермаков С.А.

Туровский А.А. см. Горбань Ю.И.

У

Удавцова Е.Ю. см. Евдокимов В.И.

Ушков В.А., Горюнова А.В., Золотарев М.Е., Ушков М.В. Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных поли-

меров на основе реакционноспособных олигомеров, № 3, 41

Ушков М.В. см. Ушков В.А.

Х

Хабибуллин Р.Ш. см. Малютин О.С.

Харламенков А.С. Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей, № 6, 79

Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1, № 1, 89

Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2, № 2, 79

Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3, № 3, 93

Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 4, № 4, 86

Холостов А.Л. см. Пузач С.В.

Ц

Цариченко С.Г. см. Горбань Ю.И.

Ч

Чистяков Т.И. см. Пузач С.В.

Ш

Шабунина Д.Е., Данилов А.И., Гравит М.В. Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров, № 3, 54

Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара, № 4, 31

Шебеко Ю.Н. Пожарная опасность взрывных режимов испарения сжиженного природного газа, № 1, 80

Щетнев К.П. см. Пузач С.В.

Я

Яшин Н.В. см. Галигузов А.А.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2023 г.

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ		
Барановский А.С. Защита маломобильных групп населения при пожаре в рамках требований действующих нормативных документов. Необходимость или избыточность?	1	9–27
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Голкин А.В., Гомозов А.В. Противопожарные требования к зданиям и сооружениям для отдыха и оздоровления детей.	5	5–15
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Голкин А.В. Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины.	1	28–40
ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА		
Корольченко А.Д. Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам	3	9–16
Пузач С.В., Бачурин Д.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Балаев А.А. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах.	1	41–50
БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ		
Болодьян И.А., Вогман Л.П., Корольченко Д.А. Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести	3	17–30
Галигузов А.А., Сердан А.А. (мл.), Яшин Н.В., Авдеев В.В. Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе	5	26–39
Головина Е.В., Калач А.В. Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны	6	5–12
Еремина Т.Ю., Сушкова О.В. Исследования характеристик пожарной опасности паркетов исторических объектов с массовым пребыванием людей	3	31–40
Константинова Н.И., Зубань А.В., Серков Б.Б., Голов Н.В. Вопросы огнезащиты напольных ковровых покрытий	5	16–25
Полетаев Н.Л. Взрывоопасность аэрозвеси сухой молочной сыворотки	1	51–56
Ушков В.А., Горюнова А.В., Золотарев М.Е., Ушков М.В. Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров	3	41–53
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ		
Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П., Вагнер П. Моделирование в области обеспечения пожарной безопасности (обзор).	1	57–68
Гусарова А.А. Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий	6	36–46
Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети	5	40–48
Ланской П.С., Корольченко Д.А. Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции	6	13–24

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Присадков В.И., Мушлакова С.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий	4	5–14
Пузач С.В., Лебедченко О.С. Математическое моделирование натекания водорода в гермоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200	2	9–17
Самарин И.В., Кухарский В.В. Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности с применением цифровых двойников объектов ТЭК	6	25–35
Шабункина Д.Е., Данилов А.И., Гравит М.В. Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров	3	54–68
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА		
Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи	2	18–32
Пузач С.В., Лебедченко О.С., Зыков В.И., Холостов А.Л., Чистяков Т.И. Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки	5	49–59
БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ		
Поландов Ю.Х. Задача о гистерезисе в работе предохранительного клапана прямого действия	4	15–30
Прытков Л.Н., Барбин Н.М., Титов С.А. Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя	2	33–43
Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Щетнев К.П., Косьянова Е.Н. Экспериментальное определение показателей пожарной опасности технических масел в маломасштабных установках	6	47–55
БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ		
Антонов С.П., Гарашенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой	6	56–68
Гасиев А.А., Павлов В.В., Гомозов А.В. Особенности обеспечения пожарной безопасности при проектировании строительных конструкций модульных зданий.	4	42–57
Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций	2	44–58
Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований огнестойкости сжатых железобетонных элементов с повышенным процентом армирования с численными расчетами	1	69–79
Корольченко А.Д., Громов Н.В. Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях.	6	69–78
Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Расчетная оценка эффективности технических решений по естественному проветриванию обычных лестничных клеток при пожаре в жилых зданиях	3	69–81
Пехотиков А.В., Ивашук Р.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий	2	59–70
Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара.	4	31–41

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Шебеко Ю.Н. Пожарная опасность взрывных режимов испарения сжиженного природного газа	1	80–88
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ		
Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Гудзь Ю.В., Удавцова Е.Ю. Региональные риски производственных травм и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2006–2020 гг.)	3	82–92
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА		
Горбань Ю.И., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г., Туровский А.А. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения	4	58–67
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ		
Каменецкая Н.В., Корольков А.П., Нефедьев С.А., Моторыгин Ю.Д. Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций	4	68–76
Малютин О.С., Хабибулин Р.Ш. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова.	5	60–77
СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ		
Григорьев А.Н., Захаревский В.Б., Евтеев Д.С., Аникин С.Н. Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники.	5	78–86
Ермаков С.А., Дмитриев А.А., Постановова П.Ф., Толстиков Д.О. Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны	2	71–78
Корольченко Д.А., Селивёрстов В.И., Сасенкова А.Б. Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения	4	77–85
ВОПРОС – ОТВЕТ		
Харламенков А.С. Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей	6	79–82
Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1	1	89–96
Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 2	2	79–82
Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3	3	93–98
Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 4	4	86–90

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

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

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме 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, предположениями, гипотезами, описанными в работе.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

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

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

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

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

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

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